

Четырнадцатая ежегодная конференция
Физика плазмы в солнечной системе

11-15 февраля 2019, ИКИ РАН

Содержание

1.	<i>Секция «Теория и наблюдение Солнца»</i>	3-74
2.	<i>Секция «Солнечный ветер и гелиосфера»</i>	75-107
3.	<i>Секция «Ионосфера»</i>	108-160
4.	<i>Секция «Магнитосфера»</i>	161-198
5.	<i>Секция «Теория космической плазмы»</i>	199-212
6.	<i>Секция «Теория и наблюдение токовых слоев»</i>	213-221
7.	<i>Секция «Турбулентность и хаос»</i>	222-227
8.	<i>Секция «Прогноз космической погоды и прикладные вопросы физики магнитосферы»</i>	228-253
9.	<i>Секция «Волновые явления в космической плазме»</i>	254-275
10.	<i>Секция «Лабораторное и численное моделирование плазменных явлений в космической плазме»</i>	276-281
11.	<i>Секция «Воздействие космических факторов на атмосферу и климат Земли»</i>	282-300

THEORY OF SOLAR DIFFERENTIAL ROTATION

N. Kleeorin and I. Rogachevskii

Theory of Solar differential rotation in a density stratified turbulent convection has developed. This theory based on the combined effects of the turbulent heat flux and anisotropy of turbulent convection on the Reynolds stress. A coupled system of dynamical budget equations consisting in the equations for the Reynolds stress, the entropy fluctuations and the turbulent heat flux has solved. To close the system of these equations, the spectral τ approach, which is valid for large Reynolds numbers, has applied. The adopted model of the background turbulent convection takes into account an increase of the turbulence anisotropy and a decrease of the turbulent correlation time with the rotation rate. This theory yields the radial profile of the differential rotation which is in agreement with that for the solar differential rotation.

ОЦЕНКА ПРОДУКТИВНОСТИ МЕЛКОМАСШТАБНОГО ДИНАМО В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Абраменко В.И., Жукова А.В., Куценко А.С.
КРАО РАН, Крым, Россия, vabramenko@gmail.com

Из теории солнечного динамо следует, что сгенерированное магнитное поле состоит из трех компонент: зависящее от цикла среднее поле B , его флуктуации b , также зависящие от цикла, и, наконец, не зависящие от цикла флуктуации h , сгенерированные независимо от B мелко-масштабным турбулентным динамо (см., например, [1,2]). При этом возбуждение h -флуктуаций может происходить в широком спектре масштабов, вплоть до размеров типичной активной области (АО). Принято считать, что среднее поле проявляется как активные области, подчиняющиеся закону полярностей Хейла, закону наклона оси области (закону Джоя), и при этом лидирующее пятно компактнее и больше, чем пятна хвостовой полярности («регулярные» АО). Однако, из наблюдений следует, что далеко не все АО подчиняются этим законам. Наши исследования показывают, для трети всех АО (без учета униполярных пятен) имеются нарушения хотя бы одного из вышеуказанных законов. Чаще всего нарушается закон Джоя – он не выполняется у 80% всех «нарушителей», у 50% лидирующее пятно меньше основного хвостового, и 13% всех «нарушителей» (4% от всех мульти-полярных АО) не подчиняются закону Хейла. Таким образом, влияние турбулентности плазмы в конвективной зоне на поднимающиеся трубки среднего поля идет по нарастающей: от нарушений ориентации трубки к полному перевороту полярностей. Анти-Хейловские группы считаются наиболее характерными представителями-свидетельствами работы турбулентного динамо в конвективной зоне [2]. До сих пор их учет в рамках турбулентного динамо проводился на основе статистического анализа количества анти-Хейловских групп в общем числе групп солнечных пятен [2,3].

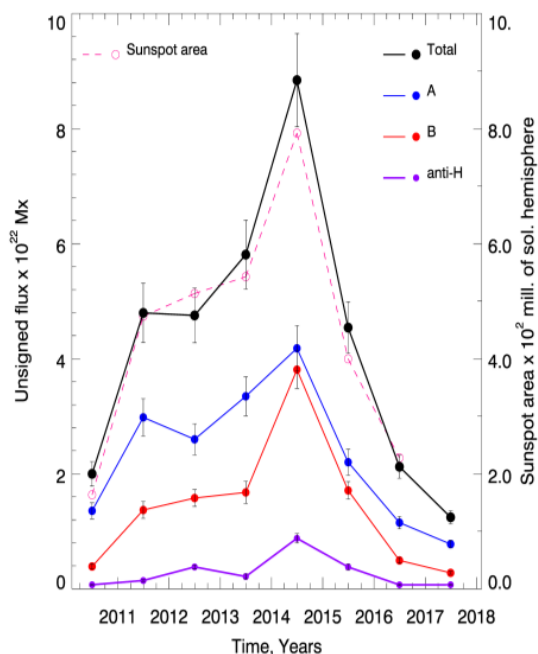


Рис.1. Суммарный по диску магнитный поток. А – все регулярные АО; В – все «нарушители»; anti-H – анти-Хейловские АО.

Мы ставим перед собой другую цель – определить вклад групп-«нарушителей», и особенно, анти-Хейловских групп, в суммарный по диску магнитный поток от активных областей и проследить, как вклады меняются в ходе 24-го цикла. SDO/HMI данные позволяют это сделать. С наступлением минимума (от 2016 к 2017 г.) доля потока анти-Хейловских групп возрастает от 3 до 6%, т.е., поток этих групп становится более явно выраженным на фоне ослабевающего потока остальных групп. Однако в период максимума, доля анти-Хейловских групп может достигать 10%, что, возможно, связано с усилением флуктуаций b среднего поля, которые также могут приводить к нарушению закона Хейла [2]. Поэтому производительность турбулентного динамо можно оценить только в периоды минимума. Величина беззнакового потока анти-Хейловских групп на магнитограмме полного диска в 2016-2017 гг является квази-постоянной и составляет 10^{21} Мкс, что можно принять как нижнюю границу производительности турбулентного динамо на масштабе активной области.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-12-00131).

1. Brandenburg A., Sokoloff D., Subramanian K. // Space Sci. Rev., 2012, V. **169**, P. 123.
2. Sokoloff D., Khlystova A., Abramenko V. // MNRAS, V. **451**, P. 1522.
3. Stenflo J.O., Kosovichev A.G. // ApJ, 2012, V. **745**, P. 129.

НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМО И ИЗМЕНЕНИЯ В ХАРАКТЕРЕ СОЛНЕЧНОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ

Попова Е.П.¹, Сагдеев Р.З.²

¹ *НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, popovaelp@mail.ru*

² *Мэрилендский университет в Колледж-Парке, Колледж-Парк, Мэриленд, США, rsagdeev@gmail.com*

Солнечная магнитная активность связана с генерацией сильных магнитных полей в солнечной конвективной зоне и имеет сложную структуру. Самым известным циклом, связанным с генерацией и изменением во времени солнечного магнитного поля, является квазипериодическое 11-летнее изменение количества солнечных пятен, уровня солнечной радиации и выброса солнечного вещества. Модель, описывающая процесс генерации магнитного поля Солнца, была предложена впервые Паркером [1], в дальнейшем развита в работах различных авторов и основывается на совместном действии дифференциального вращения и альфа-эффекта. В данной работе на базе такой модели для среднего поля мы строим динамическую систему и исследуем характер генерации поля в зависимости от динамо-числа (в которое входят амплитуды альфа-эффекта и дифференциального вращения). Нелинейный альфа-эффект состоит из двух составляющих: гидродинамической (в форме алгебраического подавления спиральности) и магнитной [2]. Для магнитной составляющей записывается отдельное уравнение, в которое входит магнитное поле Солнца. Решение системы уравнений ищется в виде ряда Фурье с коэффициентами, зависящими от времени. Исследование показало, что решение имеет характер колебаний. Вблизи порога неустойчивости основную роль играет самая длинноволновая мода, а амплитуды высших гармоник становятся существенными при значительном увеличении динамо-числа. Решение устроено таким образом, что лидирующей гармоникой является самая длинноволновая мода, амплитуды остальных мод убывают с уменьшением длины их волны. В случае, когда энергии дифференциального вращения и альфа-эффекта достаточно только для возбуждения одной гармоники, характер колебания соседних мод носит характер вынужденных, их фазы скоррелированы с фазой основной волны и стохастической составляющей в решении не возникнет. Если динамо-число достаточно далеко от порогового (что характерно для Солнца), то энергии альфа-эффекта и дифференциального вращения будет достаточно для возбуждения двух или нескольких собственных мод и при их взаимодействии возникнет стохастическая составляющая в генерации магнитного поля. Наблюдения Солнца показывают, что в солнечной активности, кроме регулярной, присутствует и хаотическая составляющая.

Исследование показало, что в нелинейной задаче "эффективное" динамо-число, которое определяется как произведение дифференциального вращения и среднего значения альфа-эффекта в цикле модельной солнечной активности остается близко к пороговому значению динамо-числа, соответствующего переходу от затухающего решения к незатухающему. Поэтому период цикла меняется мало в зависимости от "номинального" динамо-числа, которое входит в данную задачу как управляющий параметр и для которого обычно делаются оценки на базе наблюдательных и модельных данных. Рассеивание энергии на высших гармониках более выражено при более высоких динамо-числах благодаря нелинейности.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ РАН, при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 17-22-010022 офи_м.

1. Parker E. // *Astrophysical Journal*, 1955. V. **122**. P. 293.
2. Pouquet A., Frisch U. and L'eorat J. // *J. Fluid Mech.*, 1976. V. **77**. P. 321

СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЭВОЛЮЦИИ

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

КрАО РАН, пгт. Научный, Республика Крым, Россия, olga.k.kutsenko@yandex.ru

В данной работе мы рассчитывали спектры мощности магнитного поля всплывающих активных областей. Для расчета спектров мощности применялся подход, разработанный в работе [1]. Исходными данными служили магнитограммы продольного магнитного поля, полученные инструментом Helioseismic and Magnetic Imager орбитальной обсерватории Solar Dynamics Observatory.

Цель работы – установить, на каких масштабах преимущественно происходит увеличение магнитной энергии всплывающей активной области – на малых масштабах, когда активная область формируется при слиянии малых магнитных элементов, или на больших масштабах, когда магнитный поток поднимается из конвективной зоны на поверхность Солнца как монолитная структура. Также мы анализировали изменение наклона спектра мощности активной области в процессе всплытия.

Для минимизации эффекта проекции, мы выбрали четыре активные области, а именно NOAA 11076, 11726, 11781, 12275, которые всплывали и достигали максимального значения магнитного потока в течение трех-четырех дней, находясь при этом в пределах 30 гелиографических градусов от центрального меридиана.

Было установлено, что до всплытия активной области наблюдается пологий спектр, соответствующий спокойному Солнцу. Затем, в момент всплытия, происходит резкое увеличение наклона спектра с увеличением энергии на всех пространственных масштабах. Это означает, что всплывают одновременно как малые магнитные элементы, так и более крупные поры и пятна. После всплытия наблюдался крутой спектр, характерный для активных областей. Резкое увеличение наклона спектра можно использовать для диагностики момента всплытия активной области.

Интересно, что, хотя всплытие начинается с увеличения энергии в широком диапазоне масштабов, но со временем сильный прирост энергии доминирует уже на больших масштабах (более 6 Мм). Также было выявлено, что прямой и обратный каскад, хоть и не являются основными способами эволюции пятна, однако наблюдаются эпизодически. В трех областях был обнаружен прямой каскад (распад пятна на более мелкие магнитные элементы).

Обратный каскад, или формирование крупных структур из малых, также наблюдался эпизодически. Так, например, в активной области NOAA 11781 убыль энергии на малых масштабах превышала прирост энергии на больших, т.е. уменьшение энергии на малых масштабах вносило вклад в формирование больших пятен. В активных областях NOAA 11076 и 12275 наблюдалось формирование пятен из малых магнитных элементов, однако энергия для формирования пятен черпалась не только за счет уменьшения энергии на малых масштабах, но и из других источников.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-12-00131.

1. Abramenko V.I., 2005, ApJ, 629, 1141

СПЕКТРЫ ПЕРЕМЕЖАЕМОСТИ ТОКОВОЙ СПИРАЛЬНОСТИ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ НА СОЛНЦЕ

Куценко А.С., Абраменко В.И., Кузанын К.М.

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

В работе проводится исследование пространственной структуры токовой спиральности и ее динамики. Исходными данными служили наблюдения инструмента Helioseismic and Magnetic Imager обсерватории Solar Dynamics Observatory, в частности, использовались карты полного вектора магнитного поля. Токовая спиральность рассчитывалась с помощью интегральной формулы, предложенной в работе [1]. Для анализ пространственной структуры токовой спиральности использовался метод структурных и флэтнесс-функций [2]. Наклон флэтнесс-функции служил мерой пространственной сложности токовой спиральности: увеличения наклона флэтнесс-функции соответствует увеличению сложности и перемежаемости исследуемого двумерного поля.

Для анализа были выбраны три активные области, а именно NOAA 11158, 12494 и 12673. Для каждой активной области рассчитывался ряд параметров (полный магнитный поток, полная токовая спиральность, наклоны флэтнесс-функции продольного поля, токовой спиральности и модуля поперечного поля) и отслеживалась их эволюция во времени (рис. 1).

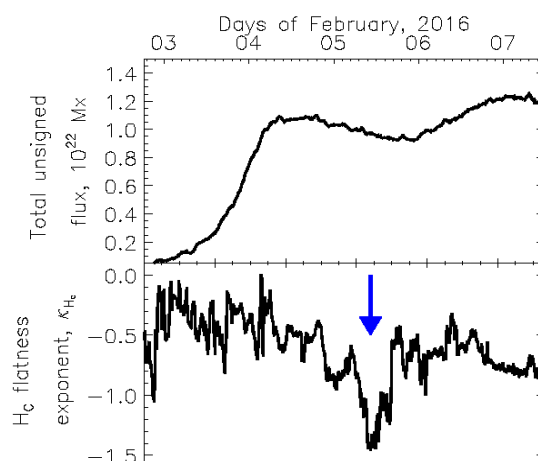


Рис. 1. Изменение полного магнитного потока (верхняя панель) и наклона флэтнесс-функции токовой спиральности (нижняя панель) активной области NOAA 12494. Синей стрелкой показано резкое увеличение абсолютной величины наклона флэтнесс-функции перед началом увеличения полного магнитного потока.

Все три активные области имели общую черту – в них наблюдалось всплытие нового магнитного потока в непосредственной близости от уже существующей магнитной структуры. Было обнаружено, что, приблизительно за 12 часов до начала всплытия, наблюдается резкое увеличение абсолютной величины наклона флэтнесс-функции токовой спиральности. Мы полагаем, что данное явление может быть связано с подфотосферной фрагментацией токовой системы активной области всплывающим магнитным потоком.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № [17-52-53203](#).

1. [Abramenko, V.I., Wang, Tongjiang; Yurchishin, V.B.](#), 1996, Solar Physics, 168, 75.
2. Abramenco, V.I., 2005, Solar Physics 228, 29.

ФЛУКТУАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМО КАК ПРИЧИНА АСИММЕТРИИ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ

Непомнящих А.А., Кичатинов Л.Л.

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

Длительность роста активности в солнечных циклах в среднем короче длительности спада. Показано, что к такой асимметрии могут приводить флуктуации параметров динамо. Флуктуации характеризуются временем корреляции и амплитудой. Была получена статистика расчётных циклов для разных амплитуд и времен корреляции. Удалось сопоставить периоды расчётных циклов с данными наблюдений, что позволило определить наиболее подходящую величину времени корреляции. Расчёты модели показывают, что влияние флуктуаций зависит не только от их величины (превышения или уменьшения), но и от фазы динамо-цикла, в котором происходят флуктуации. Фазовая зависимость обусловлена разницей в динамо-процессе между восходящей и нисходящей фазами циклов активности и может быть интерпретирована в терминах основных механизмов динамо. Модель солнечного динамо с флуктуациями α -эффекта показывает средне-статистическую асимметрию, которая увеличивается с возрастанием как длительности флуктуаций, так и амплитуды. Предложено объяснение вызванной флуктуациями асимметрии, которое предсказывает корреляцию между величиной асимметрии и временем запаздывания обращений знака полярного поля относительно максимума активности. Такая корреляция подтверждается данными о двенадцати последних солнечных циклах.

ТОНКАЯ СТРУКТУРА КВАЗИ-ДВУХЛЕТНИХ ВАРИАЦИЙ ПЛОЩАДИ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН В ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

¹Костюченко И.Г., ²Бруевич Е.А.

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

²ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова

Квазидвухлетние вариации (КДО), наблюдаемые на фоне 11-летнего цикла солнечной активности (СА) и проявляющиеся в вариациях всех индексов СА, являются одним из фундаментальных свойств СА. Многочисленными исследованиями установлено, в частности, что КДО не имеют определенного периода [1].

В данной работе исследованы закономерности изменения периода КДО площади солнечных пятен в цикле солнечной активности на основе данных обсерватории Гринвич (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>) за 19-23 циклы солнечной активности. Для получения локальных значений периодов КДО использовалось вейвлет-преобразование с материнским вейвлетом Добеши (Daubechies) 10, которое позволяет детально выявить параметры нестационарных вариаций.

Оказалось, что в каждом цикле СА на временном масштабе меньше 3-3.5 лет периоды изменяются не беспорядочно, а монотонно уменьшаются, образуя характерные последовательности. Таких последовательностей часто наблюдается одновременно две, с разным начальным периодом. Выявленная структура вариаций объясняет сложность в определении единого периода КДО. Изменение периода КДО происходит синхронно с изменением средней широты пятен, что, по-видимому, указывает на связь периода КДО со скоростью вращения области конвективной зоны Солнца, в которой в соответствующее время формируются пятна.

На основе полученных вейвлет-карт были определены значения всех значимых периодов и их положение на временной шкале. Для каждого периода вычислялась соответствующая ему средняя широта пятен. Полученная зависимость периода КДО от средней за период широты пятен носит линейный характер, что может означать обратно пропорциональную зависимость периода КДО от скорости вращения зоны формирования пятен.

Обнаруженное уменьшение периода КДО синхронно со смещением зоны пятенной активности к экватору указывает на локализацию процесса, ответственного за генерацию КДО, в слое конвективной зоны с существенным широтным градиентом скорости вращения. В области тахоклина, где, как считается, оперирует процесс, ответственный за генерацию 11-летнего цикла СА, широтный градиент низкий; высоким он становится в верхней части конвективной зоны [2]. Т.о. полученные результаты являются аргументом в пользу гипотезы двойного магнитного цикла [3].

1. Bazilevskaya G. et al // Space Sci Rev 186, 359, 2014
2. Schou J. et al // ApJ 506, 390, 1998
3. Benevolenskaya E.E. // ApJ 517, L163, 1999

НЕЛИНЕЙНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЯТЕННОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ СОЛНЦА

Наговицын Ю.А., Певцов А.А.

ГАО РАН, г.С.-Петербург, Россия, nag@gaoran.ru, NSO, USA

Предложена интерпретация процесса солнечной цикличности как реакции на квазисинусоидальное воздействие осциллятора с кубической нелинейностью и линейным затуханием (дуффинговского осциллятора). Для этого использовалось сравнение эмпирической амплитудно-частотной зависимости с теоретической зависимостью, полученной методом усреднения Крылова-Боголюбова. В качестве данных использовались как новая версия 2.0 серии чисел солнечных пятен *SN* (Clette et al., 2014), начиная с 1700 года, так и версия серии чисел групп пятен *GN* (Svalgaard & Schatten, 2016), масштабированная к *SN*, для 17-го века. Полученный результат имеет лучшую внутреннюю согласованность, чем предыдущий результат (Наговицын, 1997) для версии 1.0 *SN*. Представлен прогноз следующего 25 цикла солнечной активности.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-02-00088, и Программы Президиума РАН № 28.

1. Clette F., Svalgaard L., Vaquero J. M., & Cliver E.W. // Sp. Sci. Rev. 2014. V. **186**. P. 35.
2. Svalgaard, L. & Schatten, K.H. // Solar Phys. 2016. V. **291**. P.2653.
3. Nagovitsyn, Yu.A. // Astron. Lett. 1997. V. **32**. P. 851.

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ СВОЙСТВА ТИЛЬТА ГРУПП ПЯТЕН И ЗАКОН ДЖОЯ ВБЛИЗИ ЭКВАТОРА СОЛНЦА

Кузанын К.М.¹, Сафиуллин Н.Т.², Клиорин Н.И.³, Рогачевский И.^{3,4}, Поршневу С.В.², Тлатов А.Г.⁵

¹*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, 108840, Россия, г. Москва, kuzanyan@izmiran.ru*

²*Департамент информационных технологий и автоматики Уральского федерального университета, ул. Мира, 19, 620002, Россия, г. Екатеринбург*

³*Департамент Механики, Факультет инженерных Наук, Университет им. Бен-Гуриона в Негеве, Р. О. Вох 653, 84105 Беэр-Шева, Израиль*

⁴*Nordita, Королевский технологический институт КТН и Стокгольмский университет, Roslagstullsbacken 23, 10691 Stockholm, Швеция*

⁵*Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Россия*

Предложен физический механизм образования угла закрутки (тильта) групп солнечных пятен в процессе образования активных областей под фотосферой Солнца. Детально исследуются факторы, связанные с влиянием сил Кориолиса на крупномасштабные течения в супер-грануляционной конвекции в турбулентной среде.

На основе расчетов магнитного поля по модели солнечного нелинейного динамо Kleeorin et al. (2016) и Safiullin et al. (2018) сделаны оценки порядков величины данного эффекта и оценен тилт-угл в диапазоне широт «королевской зоны» пятенной активности. Эта динамо модель основана на балансе мелко-масштабной и крупно-масштабной магнитной спиральностей, которая описывает в деталях процесс образования солнечных пятен за последние пять циклов активности (начиная с 1964 г.), адаптированная для более широкого класса магнитных проявлений солнечной активности.

Построены зависимости среднего тильта за эти пять циклов активности и широтно-временные диаграммы распределения этого значения, в целом удовлетворяющие закону Джоя, но также и показывающие локальные отклонения от него в ограниченном диапазоне широт в отдельных фазах солнечного цикла [1].

Исследования К.М. Кузанына и Н.Т. Сафиуллина выполнены за счет гранта Российского Научного Фонда (проект РНФ 18-12-00131) в Крымской Астрофизической Обсерватории РАН.

1. K.M. Kuzanyan, N. Safiullin, N. Kleeorin, I. Rogachevskii, S. Porshnev “Large Scale Properties of Tilt of Sunspot Groups and Joy's Law Near The Solar Equator” // <https://arxiv.org/abs/1810.05200>

ТЕКУЩИЙ ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИТОГИ, ПРОГНОЗ АКТИВНОСТИ И ОЖИДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛЕДУЮЩЕГО ЦИКЛА

Ишков В.Н.

ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия, vitish@wdcb.ru

Текущий 24 солнечный цикл (СЦ), открывший 2 эпоху пониженной солнечной активности (СА) вступил в последний период своего развития (от $W^*=5$ до точки минимума), который может продлиться до полутора лет. Опыт исследования низких циклов первого периода пониженной СА даёт границы наступления минимума текущего СЦ от января 2020 г. до января 2021 г. С учётом длительности предыдущего переходного СЦ (23), наиболее вероятным представляется наступление минимума в марте - апреле 2020 г. Согласно сценарию цикличности вторая эпоха «пониженной» СА перекроет всю первую половину XXI века. Основной особенностью этой эпохи (5 циклов) – запрет на осуществление высоких СЦ и непереносимое выполнение основных наблюдательных правил, в том числе правила Гневывшева-Оля, по которому следующий 25 СЦ должен быть средней величины. Согласно правилам Вальдмайера и гладкости ветвей роста СЦ уже через два с половиной года после начала ветви роста нового цикла можно будет оценить его высоту.

Изменение более чем в два раза фона общего магнитного поля Солнца привело к значимому снижению геоэффективности солнечных активных явлений, полной перестройке физических условий во внутренней (а может и во внешней) гелиосфере и отразилось на состоянии околоземного космического пространства (ОКП). Темп развития вспышечной активности и её величина в текущем СЦ существенно ниже, чем в предыдущих 5 СЦ, входивших в эпоху "повышенной" СА и переходного периода. За 10 лет развития текущего цикла в его активных областях осуществилось 780 вспышек среднего балла М, из которых 110 были большими и 60 вспышек рентгеновского класса X, причём 31 такая вспышка осуществилась всего в 13 группах пятен. Самых мощных вспышек (для текущего СЦ) класса $X>5$ было всего 4, причём 2 из них осуществились в сентябре 2017. Соответственно, и воздействие вспышечного электромагнитного излучения на ОКП (космическая погода – класс **R**) значимо меньше, что определило и пониженные значения полного электронного содержания, и снижение критической частоты слоя foF2, и изменения других общих характеристик ионосферы, магнитосферы и, возможно, тропосферы.

За этот же период в ОКП зарегистрировано 96 солнечных протонных событий – СПС (космическая погода – класс **S**): из которых 39 СПС с потоком частиц < 100 pfu (S1), 8 – $\geq 100 - \leq 1000$ pfu (S2) и 5 СПС – ≥ 1000 pfu (S3), среди которых было 2 уверенных GLE-события и > 7 вспышек с солнечными нейтронами. Фон ГКЛ достиг минимума к середине 2015 г. и начал уверенно расти, что при падении вспышечной активности с большой вероятностью явилось причиной повышения радиационного фона в стратосфере на 18% (внешний радиационный пояс), в то же время на высотах полётов гражданской авиации фон существенно не повысился.

Значимые возмущения геомагнитного поля (космическая погода – класс **G**) отмечались реже и они были существенно слабее: в ОКП зарегистрировано лишь 4 большие магнитные бури ($A_p \geq 70$), две из которых, самые мощные в цикле, осуществились в 2015 г.: 17.03 ($A_p=117$ nT, $Dst=-223$ nT) и 22 – 23.06 ($A_p=83$ nT, $Dst=-195$ nT). В то же время среднее количество рекуррентных малых магнитных бурь осталось на уровне предыдущих циклов или немного возросло.

СОЛНЕЧНАЯ КОРОНА КАК ИНДИКАТОР ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ ПОДФОТОСФЕРНЫХ СЛОЕВ

Обридко В.Н., Бадалян О.Г.

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

Ранее мы предложили метод использования магнитного поля короны как неявного трассера для изучения дифференциального вращения солнечной короны. Практически, в настоящее время это единственная возможность изучения вращения Солнца на больших гелиоцентрических расстояниях, вплоть до поверхности источника. В данной работе расчеты магнитного поля в короне были распространены на больший временной интервал, до 31 декабря 2015. Нами показано, что солнечная корона вращается дифференциально на всех гелиоцентрических расстояниях от основания короны до поверхности источника. С увеличением расстояния степень дифференциальности уменьшается. По мере приближения к поверхности источника вращение короны постепенно приближается к твердотельному, но даже на больших расстояниях остается слабо дифференциальным. Мы предполагаем, что дифференциальное вращение короны отражает вращение глубоких подфотосферных слоев. В таком случае, изменение характеристик вращения короны может быть использовано как индикатор дифференциального вращения подфотосферных слоев. Мы сопоставили изменение характеристик вращения короны с расстоянием с данными, полученными методами гелиосейсмологии. Получено удовлетворительное соответствие с данными гелиосейсмологии. Впервые изучена вариация дифференциального вращения подфотосферных слоев с фазой цикла.

ДИСКРЕТНАЯ КРИВИЗНА РИЧЧИ И ГРАФОДИНАМИКА АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Князева И.С., Макаренко Н.Г.

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, ng-makar@mail.ru

Динамику фотосферных магнитных полей в Активных Областях (АО) отслеживают по изменению наблюдаемых паттернов на магнитограммах. В прогностических задачах полагают, что можно подобрать подходящие дескрипторы так, что их значительные изменения могут отслеживать большую вспышку. Дескрипторами служат обычно метафоры привычных физических понятий таких как общий беззнаковый поток, первые моменты градиентов, токи и токовая спиральность, общий эксцесс энергии и т.д. Эти аналоги не определены строго для случая дискретного носителя. Их минимальный набор содержит 18 так называемых SHARP параметров, выделенных по их прогностической перспективности. Такое пространство признаков имеет чрезмерно большую размерность для которой эффекты концентрации меры осложняют решения прогностических задач.

Можно вообще отказаться от «попиксельной» арифметизации магнитограммы, заменив ее наблюдаемую геометрию некоторым скелетоном или графом. Если он будет аппроксимировать скалярное поле в некотором, строго определенном смысле, то динамику АО можно будет отслеживать перестройкой графа, т.е. *графодинамикой*. Существует несколько способов построения таких графов.

Один из них основан на формановских градиентных моделях поля, в рамках дискретной теории Морса. Наблюдаемое поле разбивается при этом на клетки, образующие комплексы Морса-Смейла. Каждая клетка содержит максимум, минимум и две седловых точки поля. Комплексы допускают редукцию (топологическое упрощение) с сохранением характеристики Эйлера. Полученный в результате граф Морса, может быть использован для графодинамики.

Другой способ основан на построении критической сети в пространстве масштабов – Scale-Space. Он реализуется последовательной сверткой магнитограммы с гауссовским ядром. Свертка для компакта эквивалентна второй краевой задаче. Аппроксимация производной по ширине ядра, которая играет роль времени в уравнении диффузии, позволяет оценить лапласиан. Он содержит минимумы и максимумы поля для выбранного устойчивого масштаба. Они и используются для построения критической сети.

Упомянутые графы перестраиваются в процессе эволюции АО. Графодинамику удобно описывать либо спектром комбинаторного Лапласиана (т.е. матрицы Кирхгофа-Лапласа) либо дискретной кривизной Оливье-Риччи. Последняя является аналогом классической кривизны Риччи, для графа, и вычисляется для каждого ребра решением транспортной задачи Монжа-Канторовича. Роль переносимой массы играет степень вершин графа, которая описывает количество входящих в нее ребер. Напомним, что в Римановой геометрии, кривизна Риччи определяется сравнением длины длины геодезической, соединяющей две точки, с усредненным расстоянием между точками их окрестностей. Последнее эквивалентно нахождению расстояния Вассерштейна в задаче переноса массы из одной окрестности в другую. Кривизна Оливье-Риччи связана неравенствами с спектром комбинаторного лапласиана и энтропией Больцмана, поэтому ее изменение можно интерпретировать в физических терминах. В докладе приводятся примеры полученных оценок кривизны для графодинамики вспышечных АО.

КАК МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ПОМОГАЕТ АНАЛИЗИРОВАТЬ НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЦА

Илларионов Е.А.^{1,3}, Тлатов А.Г.^{2,3}

¹МГУ, г. Москва, Россия, egor.mypost@gmail.com

²Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, tlatov@mail.ru

³КалмГУ, г. Элиста, Россия

Методы машинного обучения сегодня активно внедряются в различные системы и продукты, оперируя весьма разнообразными по природе данными: 2D и 3D изображения, видеопоток, временные ряды, текст. При этом весьма нетрудно найти аналогии между задачами обработки наблюдательных данных по Солнцу и известными примерами успешного применения методов машинного обучения. Отсюда возникает интерес по-новому взглянуть на подходы к обработке наблюдений. В докладе будет дан обзор актуальных работ в данном направлении и рассказано о работе авторов по построению модели выделения корональных дыр на изображениях Солнца, основанной на сверточных нейронных сетях. Для обучения модели использовался многолетний архив обработки корональных дыр, собираемый Кисловодской горной астрономической станцией. Тестирование модели на независимой подвыборке показывает устойчивость и высокое совпадение предсказаний модели и результатов ручной обработки. Тем самым открывается возможность для построения моделей выделения всего спектра активных областей Солнца.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 18-02-00098, и Российским научным фондом, проект 15-12-20001.

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР НА ФАЗЕ СПАДА АКТИВНОСТИ 24 ЦИКЛА

Андреева О.А., Малащук В.М.

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

Исследованы вариации характеристик долгоживущих (время существования несколько месяцев) и короткоживущих (время существования несколько дней) корональных дыр (КД) в процессе их эволюции от возникновения до исчезновения на фазе спада солнечной активности 24 цикла. В работе использованы наблюдения Солнца в линии HeI 1083 нм (КрАО РАН), данные SDO (AIA, канал 19.3 нм, HMI, магнитные измерения). Получены следующие результаты: для отдельных КД скорости их возникновения и распада существенно различаются. Для короткоживущих КД время от возникновения до максимума площади может занимать несколько часов. Для долгоживущих КД этот процесс может занимать несколько оборотов Солнца. На фоне плавного развития иногда происходит кратковременный рост площади КД за счет ее прироста на границе дыры.

Результаты исследования могут быть широко использованы в области создания методов прогноза эволюции солнечных образований, а также прогнозирования космической погоды, имеющей большое значение для человека, техно- и биосферы Земли.

НОВЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТР КРАО РАН: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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

КРАО РАН, пгт. Научный, Крым, Россия, plotnikov.andrey.alex@yandex.ru

В настоящее время в Крымской астрофизической обсерватории РАН проводится разработка нового солнечного спектрополяриметра, который будет установлен на одном из крупнейших солнечных телескопов России БСТ-1. В данной работе приводится краткое изложение текущего состояния инструмента и описываются результаты первых тестовых наблюдений.

БСТ-1 представляет собой телескоп системы Кассегрена с диаметром главного зеркала 0.9 м и эквивалентным фокусным расстоянием 50 м. В главном фокусе оптическая система телескопа строит изображение Солнца диаметром 0.45 м. Телескоп оборудован двухканальным Вавcock-типе магнитографом. В качестве первого шага модернизации аппаратуры, в качестве приемников излучения были установлены линейные ПЗС-камеры вместо ФЭУ, что позволило измерять спектры солнечного излучения в полосе длин волн порядка 2 ангстрем. Также на новую элементную базу были переведены некоторые электронные узлы магнитографа.

В течение лета 2018 года были проведены тестовые наблюдения активных областей на Солнце. Комбинация геометрических размеров щели спектрографа, коэффициента увеличения оптической системы спектрографа и размера пикселя ПЗС-камеры определяли угловой размер участка на поверхности Солнца, излучения которого регистрируется магнитографом и который составлял $0.5'' \times 1''$. Путем сканирования поверхности Солнца с помощью поворота целостатной пары строились карты распределения излучения с круговой поляризацией по поверхности Солнца. Величина продольного магнитного поля определялась из уровня круговой поляризации излучения в приближении слабого поля.

Для наблюдений были выбраны два спектральных участка, перекрывающих фотосферную линию Fe I 5250 Å и хромосферную линию Mg I 5173 Å, что позволило проводить измерения магнитных полей одновременно на двух высотах в атмосфере Солнца.

Сравнение полученных магнитограмм продольного магнитного поля показало хорошее согласие с результатами наблюдений инструмента Helioseismic and Magnetic Imager орбитальной обсерватории Solar Dynamics Observatory. Кроме того, как и ожидалось, хромосферное магнитное поле более «размыто» по сравнению с фотосферным, что показывает адекватность наблюдений.

В работе также описываются дальнейшие шаги, которые мы планируем предпринять для дальнейшего развития инструмента.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект 18-12-00131.

СВОЙСТВА ПЯТЕН И ПОР В 24-М ЦИКЛЕ АКТИВНОСТИ

Тлатов А.Г.^{1,2}, Riehoakainen A.³, Тлатова К.А.¹

¹Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, tlatov@mail.ru

²КалмГУ, Элиста

³Department of Physics and Astronomy, University of Turku, Finland

Выполнен сравнительный анализ размеров пятен в солнечных группах. Для анализа мы использовали характеристики отдельных пятен и пор по данным синоптических наблюдений Кисловодской Горной астрономической станции в 24-м цикле активности. Построены распределения площади разных видов солнечных пятен. Для пор максимум распределения площади приходится на значение $S_{\text{por}}^1 \sim 3.5$ мдп.

Мы обнаружили, что свойства солнечных пятен с максимальной площадью S_{max} отличаются от других пятен S_{nomax} в группах солнечных пятен. В области распределения для S_{max} имеются два локальных максимума $S_{\text{mx}}^1 \sim 10$ мдп и $S_{\text{mx}}^2 \sim 130 \div 180$ мдп. Первый из них S_{mx}^1 связана с переходными пятнами, в которых полутень не развита полностью. Для регулярных пятен S_{max} , в которых имеется развитая полутень с отношением $S_{\text{sp}}/S_{\text{um}} > 3.5$, максимум S_{mx}^2 соответствует диаметру круглого пятна с $d \sim 25$ Мм. Этот размер близок к размеру супергранул. Двухвершинный характер в распределении площадей отсутствует в пятнах не являющимися максимальными в группах S_{nomax} .

Для ядер регулярных пятен S_{max} максимум распределения площади соответствует $S_{\text{mx}}^{\text{um}} \sim 25$ мдп. Таким образом, двухвершинный характер распределения площади является следствием существования пор и пятен с развивающейся полутенью.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 18-02-00098 и РНФ проект 15-12-20001.

СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ ДИНАМИК ДЛИННОПЕРИОДНЫХ КОМПОНЕНТ НОВОЙ И СТАРОЙ ВЕРСИЙ РЯДОВ ЧИСЕЛ ВОЛЬФА И СОПОСТАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ.

Шибает А. И.

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

Бельгийский центр по изучению Солнца (<http://sidc.oma.be>) с июля 2015 г. ввёл новые правила подсчёта чисел Вольфа и, соответственно, был пересчитан классический ряд среднемесячных чисел Вольфа (WSN) с 1749 по июнь 2015 г. В данной работе сравниваются характеристики старой Wold и пересчитанной Wnew версий ряда. Почленное отношение $W_{new}(t)/W_{old}(t)$ выделяет области с различными амплитудными и частотными свойствами. Отличия в свойствах этих рядов можно оценить по характеристикам циклов, соответствующих им (при разбиении на циклы «новой» версии ряда также проведено усреднение по 13 месяцам). Сопоставлены базовые параметры (длительности цикла и его ветви роста, максимум) и статистические оценки (первые четыре момента) циклов.

Так как амплитудная коррекция циклов 10 и $18 \div 24$ значительно отличается от коррекции остальных циклов, то также сравниваются и длиннопериодные («вековые») компоненты достоверной части этих рядов с 1849 г. по 2015 г.. Эпохи максимума/минимума солнечной активности тесно связаны с длиннопериодной компонентой ряда чисел Вольфа и отличие в оценке периодов «вековых» компонент приведет к различным прогнозам солнечной активности и связанных с ней явлениям.

Из проведенного анализа характеристик циклов и длиннопериодных компонент рядов трудно выделить преимущество новой версии ряда, опираясь только на пересчитанную её часть $W_{new}(t)$. Реальную оценку предложенной методики подсчета чисел Вольфа можно получить сравнивая обе версии ряда и ряд площадей начиная с июля 2015 года.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КВАЗИДВУХЛЕТНИХ ВАРИАЦИЙ В НОВОЙ ВЕРСИИ РЯДА ЧИСЕЛ ВОЛЬФА

Шибает И. Г.

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

Цюрихский ряд среднемесячных чисел Вольфа W (или WSN — Wolf sunspot number) является наиболее представительным и широко используется в различных приложениях. С введением новой методики оценки чисел Вольфа с июня 2015 г. проведена коррекция этого ряда с января 1749 г. по май 2015 г. (<http://sidc.oma.be>), т.е. предложена новая версия ряда WSN. Наибольшая трансформация коснулась циклов достоверной части ряда с 1849 г., что явно отразилось в их амплитудной коррекции и, соответственно, длиннопериодной компоненте ряда определяющей эпохи максимума / минимума солнечной активности [1].

Квазидвухлетние вариации, присутствующие в магнитном поле Солнца и в полном потоке его излучения, также проявляются в ряде параметров ионосферы Земли [2] и важно оценить степень их трансформации при таком переходе.

Данная работа сопоставляет частотный интервал квазидвухлетних вариаций обеих версий ряда. Формально, «квазидвухлетки» обогащают спектры рядов и придают циклам индивидуальный вид. Также их параметры могут выполнять диагностические функции, т. е. в представлении сигнала «огibaющая – мгновенная частота» ($\langle A(t) - F(t) \rangle$) можно судить о характере процесса по степени гладкости этих переменных [3].

1. Шибает, А. Сравнение характеристик солнечных циклов новой и старой версий ряда чисел Вольфа и динамика длиннопериодных компонент рядов. // In: Proceedings of Conference “SES 2016”, 2 – 4 November 2016, Sofia, Bulgaria, 2016, pp. 73–76.

2. Иванов-Холодный Г.С., Чертопруд В.С. Квазидвухлетние вариации полного потока излучения Солнца: их проявление в вариациях стратосферного ветра и скорости вращения Земли // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12. Т. 2. С. 291–292.

3. Shibaev, I. G. Estimation of the Reconstructed Part of the Wolf Series and the Possibility of its Correction. // Solar System Research, 42, 1, 2008, pp. 63–72. DOI: 10.1134/S0038094608010073.

**ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ 12673:
ВОЗМОЖНАЯ РОЛЬ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СДВИГА СКОРОСТИ И
ФОРМИРОВАНИЕ ЯРКИХ МОСТОВ**

Гетлинг А.В.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, A.Getling@mail.ru

Работа посвящена качественному исследованию динамики активной области (АО) 12673 по данным наблюдений с помощью инструмента HMI орбитальной Обсерватории солнечной динамики (SDO) от 1–7 сентября 2017 г. Эта область отличалась сложным строением и исключительно высокой всплывающей активностью [1–3]. Ее новые магнитные поля зародилась в непосредственной близости от одиночного пятна, которое наблюдалось также двумя оборотами Солнца раньше (в июле) как главное пятно в АО 12665 и в следующем обороте (в августе) как единственное крупное пятно в АО 12670. Бурное развитие АО 12673 пришлось на 2–4 сентября, когда с восточной стороны от главного пятна возникла сложная протяженная структура пятен и магнитных полей, дугой огибающая главное пятно. Эта структура вместе с главным пятном зрительно напоминала картину обтекания округлого тела потоком жидкости. Анализ взаимного расположения пятна и дугообразной структуры показал, что они сближались – пятно приближалось к структуре с запада, и их взаимодействие было действительно похоже на обтекание пятна потоком вещества, в котором развивалась магнитная структура. Оценка относительной скорости пятна и дугообразной структуры дает величину того же порядка, что и перепад скоростей в подповерхностном сдвиговом слое [4]. Это наводит на мысль, что устойчивое и давно сформировавшееся главное пятно было динамически связано с относительно медленно вращающимися поверхностными слоями, тогда как развитие дугообразной структуры происходило на большей глубине, где конвективная зона вращается быстрее. Комбинации доплеровграмм и карт поля горизонтальных скоростей, полученных методом локального корреляционного трассирования, показывают, что на начальной стадии развития структуры магнитный поток выносился на поверхность движениями вещества, схожими с теми, что типичны для конвекции в двух соседствующих друг с другом конвективных валах (на эти движения также накладывалось течение вдоль границы дугообразной структуры и пятна). На этапе усложнения картины магнитных полей и пятен, благодаря тесному сближению островов сильного поля, в тени пятен возникли яркие мосты, по обеим сторонам которых магнитное поле имело один и тот же знак.

1. Yang S., Zhang J., Zhu X., Song Q. // *Astrophys. J. Lett.* 2017. V. **849**. P. L21.
2. Attie R., Kirk M.S., Thompson B.J., Muglach K., Norton A.A. // *Space Weather* 2018. V. **16**. P. 1143
3. Hou Y.J., Zhang J., Li T., Yang S.H., Li X.H. // *Astron. Astrophys.* 2018. V. **610** P. A100.
4. Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F. et al. // *Science* 2000. V. **287**. P. 2456.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТОКОНЕСУЩЕГО ВОЛОКНА

Зайцев В.В.¹, Степанов А.В.^{2,3}, А.В.Мельников²

¹*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

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

³*Физико-Технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

Исследованы динамические режимы солнечного волокна с электрическим током, равновесие которого определяется силой Ампера, гравитацией и вязкостью среды. Для оценки вязкости волокно представлено в виде непроницаемого эллиптического цилиндра, движущегося в короне поперёк внешнего магнитного поля. Эллиптичность позволяет описывать различные формы волокон, от цилиндрической до конфигурации типа "занавесей". Построены фазовые диаграммы активизации волокна при усилении электрического тока, определены максимальная высота и максимальная скорость подъёма волокна. Новое положение равновесия, соответствующее новому значению электрического тока, достигается в результате колебательного процесса.

Динамическая модель применена к событию 30.03.2001, в котором электрический ток в волокне увеличился от 10^{10} А до 7×10^{10} А. (Altynsev et al. Solar Phys. 2007, 242, 111). Определены время перехода волокна в новое равновесное состояние, ≈ 8 часов, число Рейнольдса $Re \approx 1,6$ и энергия поднимающегося волокна $\approx 10^{30}$ эрг.

ТРЕХМЕРНАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОГО ФАКЕЛА

Соловьев А.А.

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

В факельных областях на Солнце наблюдаются три типа магнитных структур: мелкомасштабные факельные элементы, факельные узлы - скопления факельных гранул, и поры - малые пятна без полутени. Строение подвижных и короткоживущих факельных гранул с временем жизни 5-15 минут и магнитным полем около 200-300 гаусс хорошо описывается в рамках представлений о магнитоконвекции, а вот структура более устойчивых факельных узлов, имеющих размеры в несколько Мм, время жизни до суток и более, магнитное поле от 300 до 1200 Гс, представляет особую проблему. Широко известная модель факела [1] описывает его как углубление в фотосфере, образованное прозрачной магнитной силовой трубкой. Глядя на такую трубку сбоку, можно видеть более горячие, чем фотосфера, нижние слои. Однако, согласно этой модели, факелы не могут наблюдаться на лимбе, в то время как в действительности именно на лимбе они видны лучше всего. Несмотря на очевидную физическую несостоятельность, модель "горячих стенок" (hot walls) продолжает оставаться востребованной и неизменно цитируется в каждой работе по факелам. Нами разработана принципиально новая 3D аналитическая МГД-модель стационарного факельного узла в виде своеобразного магнитного "фонтана", состоящего из множества тонких горячих струек, вдоль которых течет плазма. Представленная модель впервые позволяет в каждой точке конфигурации рассчитывать давление, плотность, температуру и скорость плазмы по заданной магнитной структуре объекта. Модель хорошо описывает кольцевые и полукольцевые поярчания в окрестности факельных узлов [2,3], а также чрезвычайно тонкое волокнистое строение хромосферных факельных образований, наблюдаемые современными инструментами при высоком пространственном разрешении в линиях Ca II[4]. Эта тонкая волокнистая структура особенно ярко выражена на высотах температурного минимума (около 525 км над уровнем фотосферы). На уровне фотосферы факельный узел имеет вблизи оси центральный провал температуры (аналог вильсоновской депрессии в солнечном пятне), но в целом он более горячий и яркий, чем фотосфера. На всех высотах хромосферы факельный узел оказывается более горячим, чем окружающая среда при любых значениях магнитного поля из указанного выше диапазона. Таким образом, новая модель солнечного факела успешно описывает его морфологические и термодинамические особенности. Трудной задачей в исследовании факелов является проблема изменения яркости факела в зависимости от его положения на диске, при смещении от центра к лимбу. Модель горячих стенок здесь, как отмечено, противоречит наблюдениям. Температурный профиль предложенной нами модели магнитного фонтана имеет вид горячей вертикальной магнитной трубки с теплым широким основанием. Это позволяет получить зависимость контраста факела от положения на диске, которая хорошо согласуется с наблюдениями [5].

Работа поддержана РФФИ (проект 18-02-00168).

1. Spruit H.C. (1976). Solar Phys. Vol.50, pp.269-295.
2. Lites B.W., Scharmer G. B., Berger T. E., Title A. M.(2004). Solar Phys.**221**, 65-84.
3. Berger T.E., Rouppe L., van der Voort, Lofdahl M. (2007). Ap.J.,**661**. 1272-1288.
4. Jafarzadeh S., Rutten R. J. et al. (17 authors). (2017) Ap. J. Suppl. Ser. 229:11 (11pp).
5. Wang H.& Zirin H. (1987) Solar Phys.110, 281-293.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ МНОВОВОЛНОВЫХ РАДИОГЕЛИОГРАФОВ

Мельников В.Ф.

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

Наряду с широко известными солнечными радиоинструментами с пространственным разрешением, такими, как двух-частотный радиогелиограф Нобейма (Nobeyama Radioheliograph–NoRH) и многочастотный ПАТАН-600, в настоящее время начинаются наблюдения на новых радиогелиографах (Expended Owens Valley Solar Array–EOVSA, Сибирский мнововолновый радиогелиограф – SRH, Китайский спектрогелиограф – MUSER), способных получать радиоизображения в см-дм диапазоне одновременно на большом количестве частот и с высоким – субсекундным – временным разрешением. Характеристики этих новых радиогелиографов позволяют использовать их данные при решении фундаментальных задач физики солнечных вспышек и СМЕ, нагрева солнечной короны, а также при решении некоторых прикладных задач физики солнечно-земных связей. Методы радиофизики позволяют получать информацию, которая недостижима в других областях электромагнитного спектра. Это относится в первую очередь к данным о корональном магнитном поле и электронах умеренно релятивистских энергий.

В данном докладе мы ограничимся рассмотрением потенциала спектрогелиографов в связи с исследованиями физических процессов в корональных магнитных петлях и скрученных магнитных трубках (жгуты). Проблемы их существования и динамики привлекают внимание солнечных исследователей, в частности, в связи с тем, что жгуты магнитного потока считаются одним из важных индикаторов накопления свободной магнитной энергии. Принципиальная способность SRH, MUSER и EOVSА измерять параметры Стокса I и V одновременно на большом количестве частот в широкой полосе имеет фундаментальное значение. Измерения динамики пространственного распределения радиояркостности с высоким временным разрешением могут пролить свет на происхождение указанных явлений. В частности, поляризационные карты могут дать данные о динамике закручивания магнитной петли. Используя данные о частотном спектре яркости и круговой поляризации в каждой точке радиоисточника, на основе развитого автоматизированного метода прямой подгонки можно диагностировать такие параметры, как число и энергетический спектр излучающих электронов, величину и ориентацию магнитного поля, плотность плазмы. Более того, новые методы радиодиагностики позволяют определить локализацию энерговыделения и ускорения электронов и тип питч-угловой анизотропии ускоренных частиц во вспышечных петлях. А эта информация, в свою очередь, является ключом к выбору адекватного механизма и модели ускорения среди многих предлагаемых в настоящее время. Высокая чувствительность новых радиогелиографов позволит также наблюдать и измерять параметры таких тонких явлений, как МГД-колебания и волны, а также микровспышки, и, как следствие, изучать их роль в нагреве солнечной короны.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0041-2018-0005, при частичной поддержке РФФИ, проекты № 18-02-00856, 17-52-80064, и РНФ, проект № 16-12-10448.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ОДНОКАНАЛЬНОГО МАКЕТА НА «СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ»

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

ФИАН, г. Москва, Россия, evgieniy@bk.ru

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

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

В рамках первого этапа проекта был создан приёмно-детектирующий тракт и изготовлен макет одного канала регистрации терагерцового излучения. В докладе представлены результаты первых измерений на макете излучения от источников малой мощности на разных частотах в диапазоне 0,4-10ТГц.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК С СУБ-ТЕРАГЕРЦОВОЙ КОМПОНЕНТОЙ

Моторина Г.Г., Контарь Э.П., Джеффри Н.Л.С., Цап Ю.Т., Флейшман Г.Д., Степанов А.В.

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, g.motorina@yandex.ru

Суб-терагерцовые (суб-ТГц) радионаблюдения позволяют диагностировать наиболее труднодоступную для исследователей область Солнца – вспышечную хромосферную плазму. В последнее время большой интерес вызывают солнечные вспышки с необычным поведением суб-ТГц радиоизлучения, которое заключается в увеличении спектрального потока с частотой. В работе впервые проведено статистическое исследование таких событий в диапазоне 200-400 ГГц.

В предположении, что за суб-ТГц компоненту ответственен тепловой тормозной механизм излучения, детально рассмотрены 17 солнечных вспышек с растущим спектром. С учетом эффекта насыщения сигнала на основе данных космических аппаратов TRACE и SDO/AIA (1600 Å) получены оценки значений площади вспышечных ультрафиолетовых лент. Показано, что большим потокам суб-ТГц излучения соответствуют большие площади вспышечных лент. Сделан вывод об определяющем вкладе в суб-ТГц компоненту излучения оптически толстой тепловой плазмы переходной области. Получены указания, свидетельствующие о связи наблюдаемых субсекундных всплесков суб-ТГц излучения с ее радиационными потерями.

Данная работа поддержана грантом РФФИ 16-12-10448.

РАДИОВСПЛЕСК ТИПА U «*IN SITU*»: НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Juan Carlos Martinez Oliveros, Saida Diaz Castillo, Vratislav Krupar, Stuart Bale
Space Sciences Laboratory, University of California Berkeley, Berkeley CA 947220 USA

Считается что солнечное радиоизлучение типа III и U образуется электронными пучками, распространяющимися вдоль линий магнитного поля. Эти радиовсплески обычно наблюдаются в солнечной короне и, следовательно, на соответствующих частотах в сантиметровых, дециметровых и метровых волнах. Некоторые из этих всплесков типа U наблюдались на более низких частотах, что означает, что они «производятся» в межпланетном пространстве, что, по-видимому, является очень редким явлением [1]. Мы представляем результаты и анализ «*insitu*» данных с прибора SST на борту космического корабля Wind. Наблюдения за временем и углом наклона электронов с энергией от 26 до 510 кэВ 24-ого декабря 1996 г. предполагают наблюдение всплеска типа U «*insitu*».

1. Leblanc, Y., Dulk, G. A., Kaiser, M. L., & Bougeret, J.-L. // *Geophys. Res. Lett.* 1999, V.26 . P. 1089

РАДИУС И РАЗМЫТОСТЬ КРАЯ СОЛНЕЧНОГО ДИСКА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА СИБИРСКОМ РАДИОГЕЛИОГРАФЕ

Лесовой С.В., Глоба М.В.

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

Наблюдаемые на микроволнах размер и степень размытости края солнечного диска важны для уточнения моделей зависимости плотности плазмы солнечной короны от высоты, а также для калибровок солнечных инструментов полного потока. В процессе эксплуатации первой очереди Сибирского Радиогелиографа (СРГ) выяснялось, что корреляционные кривые, получаемые регулярно на СРГ, несут информацию, позволяющую оценить размер и степень размытости к краю солнечного диска. Связано это с тем, что корреляционные кривые СРГ - суммы модулей комплексных коэффициентов корреляции, получаемые в диапазоне частот 4-8 ГГц, по сути, являются суммами модулей определенных значений функций видности солнечного диска на различных частотах. Условия суммирования значений функций видности меняются в зависимости от часового угла и склонения Солнца. Это приводит к тому, что на корреляционных кривых появляются немонотонности, сильно зависящие от углового размера солнечного диска и степени его размытости к краю. Особенно хорошо эти немонотонности наблюдаются в моменты слабой солнечной активности.

В работе показаны данные СРГ, на которых отчетливо заметно влияние солнечного диска на корреляционные кривые, приведено объяснение немонотонностей корреляционных кривых и приведена модель, зависящая от размера диска, степени его размытости и частоты излучения. Аппроксимируя корреляционные кривые СРГ с помощью данной модели, можно оценить размеры солнечного диска и степень размытости к краю с точностью до нескольких угловых секунд при том, что пространственное разрешение первой очереди СРГ составляет примерно 1 угловую минуту.

СИНТЕЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ С БОЛЬШИМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ НА СИБИРСКОМ РАДИОГЕЛИОГРАФЕ

Глоба М.В., Лесовой С.В.

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

Сибирский радиогелиограф (СРГ) представляет собой радиоинтерферометр, состоящий из 48 антенн и получающий изображения Солнца посредством апертурного синтеза. Получение изображений с широким динамическим диапазоном важно, так как Солнце - протяженный источник, который может иметь множество особенностей с различной яркостью и динамикой. На рабочих частотах СРГ (4 - 8 ГГц) яркостная температура диска составляет около 15000 градусов, температура волокна - 10000 градусов, а температура вспышечных микроволновых источников может достигать 10^7 градусов. Чтобы уверенно наблюдать слабые события на фоне ярких (например, выброс корональной массы во время яркой вспышки), требуется динамический диапазон изображения около 10000:1. Существует большое количество факторов, которые могут влиять на динамический диапазон изображения. При синтезе изображений Солнца нужно учитывать как источники ошибок, присущие любому интерферометру, например, ошибки в определении фаз и амплитуд измеряемых видностей, ошибки в определении точного расположения фазовых центров антенн, ошибки коррелятора, так и специфические ошибки для инструментов, получающих изображение с большим полем зрения, например, выход за границы применимости теоремы Ван Циттерта - Цернике. В докладе рассмотрены некоторые источники ошибок и методы их устранения для повышения динамического диапазона изображений Солнца.

**РАДИОГЕЛИОГРАФИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДИНАМИКИ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ ПЕРЕД БОЛЬШИМИ
ВСПЫШКАМИ**

Мельников В.Ф.¹, Бакунина И.А.², Моргачев А.С.³, Кузнецов С.А., Шаин А.В.

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. С.-Петербург, Россия,

v.melnikov@gaoran.ru

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Нижний Новгород, Россия

³Нижегородский государственный университет, Нижний Новгород, Россия

Наблюдаемая перед большими вспышками активизация тонких плазменных структур в активной области является проявлением процессов накопления свободной магнитной энергии и формирования условий её выделения. Под тонкими структурами имеют в виду магнитные петли, волокна и скрученные магнитные жгуты с текущими вдоль них электрическими токами. Комплексное многоволновое исследование динамики таких структур позволит глубже понять физику накопления и освобождения энергии в активных областях, а также идентифицировать триггеры внезапного энергосвободения.

В настоящей работе процессы активизации тонких плазменных магнитных структур изучаются на основе наблюдений с высоким пространственным разрешением в микроволновом (Радиогелиограф Нобеля), оптическом (SDO/HMI) и ультрафиолетовом (SDO/AIA) диапазонах на примере многочасового развития активной области NOAA 12673, закончившегося вспышкой 4 сентября 2017 г. класса M1.2 (05:36). Показано, что в течение 6.5 часов до её начала временные профили излучения в МКВ и УФ диапазонах демонстрировали значительную нестационарность с характерными временами 1.5 часа и менее. В течение всего этого времени пространственное распределение МКВ и УФ яркости кардинально изменялось от двух почти параллельных петлеобразных структур, вытянутых в направлении «север-юг» в начале наблюдений (22:50 UT) до появления за ~2.5 часа до начала вспышки яркой петлеобразной структуры, вытянутой в направлении «восток-запад». Эта поперечная структура в дальнейшем продолжала усиливаться и стала источником относительно мощного излучения анализируемой вспышки. Для анализа физических причин такого поведения мы исследовали динамику: а) трехмерной структуры магнитного поля активной области, восстановленного в нелинейном бессиловом приближении по данным векторного фотосферного магнитного поля; б) свободной магнитной энергии в трех основных петельных структурах активной области; в) двумерного распределения вертикальных электрических токов на уровне фотосферы. Проведено сопоставление временных профилей нестационарного излучения (включая квазипериодические колебания) из различных участков активной области.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0041-2018-0005, при частичной поддержке РФФИ, проекты № 18-02-00856, 17-52-80064, и РНФ, проект № 16-12-10448.

СОЛНЕЧНЫЕ РАДИОВСПЛЕСКИ, СВЯЗАННЫЕ СО СТОЯЧИМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ (TERMINATION SHOCK)

Чернов Г.П., Фомичев В.В.

ИЗМИРАН, gchernov@izmiran.ru

Стандартная модель солнечной вспышки в области магнитного перезамыкания содержит отходящие вверх и вниз от токового слоя быстрые ударные фронты. Эта общепринятая схема используется для интерпретации многих вспышечных явлений, наблюдающихся в крайнем ультрафиолетовом, жестком рентгеновском и радио излучении. Для объяснения многочисленных данных SDO и RHESSI, а также по радио всплескам (включая различные тонкие структуры радиоизлучения), появление ускоренных частиц часто связывают с ускорением на ударном фронте. В последние годы это ускорение стали связывать со стоячей ударной волной (termination shock), а в ряде работ (Aurass, Mann, Warmuth (2009)) с этим явлением связывают замедление частотного дрейфа всплесков, подобных всплескам II типа (и даже их обратный дрейф). Дополнительное подтверждение такому механизму приведено в работе Chen, Bastian et al. (2015). При этом всегда наблюдающиеся в крупных вспышках классические всплески II типа (с начальными частотами в метровом диапазоне) обычно не связывают с этими ударными фронтами. Считается, что они вызываются корональными выбросами материи (КВМ), возбуждающими поршневые ударные волны. Но в дециметровом и микроволновом диапазонах иногда наблюдаются необычные полосы в излучении (медленно дрейфующие как к низким, так и к высоким частотам), похожие на кратковременные всплески II типа. Приведенные здесь многочисленные примеры спектров таких всплесков дают основание для предположения о их связи с termination shocks, причем как с нижним, так и с верхним отходящими фронтами. Нижняя termination shock объясняется столкновением ударного фронта с замкнутой вспышечной петлей, а верхняя termination shock может вызываться столкновением верхнего фронта с расположенной выше глобальной петлей (или с магнитным облаком – потенциальным КВМ). Дрейфовое ускорение частиц в termination shock должно приводить к генерации быстрых радиовсплесков типа спайков и всплесков в мягком и жестком рентгеновском излучении. Во всех рассматриваемых здесь явлениях эти всплески обнаруживаются.

РАЗЛИЧИЕ ОБЛАСТЕЙ ЗАРОЖДЕНИЯ БЫСТРЫХ И МЕДЛЕННЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ

Филиппов Б.П.

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

Корональные выбросы вещества тесно связаны с эрупциями протуберанцев и обычно являются их продолжением в верхней короне Солнца. Выбросы принято разделять на быстрые и медленные. Быстрые выбросы чаще следуют за эруптивными явлениями в активных областях вблизи крупных групп солнечных пятен, включающие в себя вспышечные процессы. Медленные выбросы обычно ассоциируют с эрупциями больших спокойных протуберанцев, расположенных вдали от активных областей. Однако эруптивные протуберанцы могут инициировать и быстрые выбросы. Мы проанализировали два эруптивных события с участием больших спокойных волокон, одно из которых сопровождалось быстрым выбросом, а второе – медленным. Оценены первоначальные запасы свободной магнитной энергии в двух областях и показано, что исходные состояния очень схожи. Различия дальнейшей эволюции эруптивных протуберанцев и их превращения в быстрый и медленный выбросы объясняется различием структуры магнитного поля над волокнами, оцененной по расчетам потенциального магнитного поля в короне.

НАБЛЮДЕНИЕ ВЗРЫВНОЙ ВОЛНЫ ОТ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ В СОБЫТИИ С ПСЕВДО КВМ

Еселевич В.Г.¹, Еселевич М.В.¹, Зимовец И.В.²

¹*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*

²*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ivanzim@iki.rssi.ru*

Представлен анализ солнечного события SOL2014-03-06T09:23 вблизи восточного лимба, в котором прибором LASCO C2 обнаружен так называемый псевдо корональный выброс массы (КВМ), обозначенный как “Poor Event; C2” в каталоге КВМ SOHO LASCO. Анализ проведен с использованием трех основных методов: 1) исследование профилей разностной яркости вдоль определенных направлений в солнечной короне по данным наблюдений прибором SDO/AIA в ВУФ диапазоне; 2) исследование пространственно-разрешенных наблюдений радиовсплеска II типа с помощью радиогелиографа Нансе; 3) экстраполяция магнитного поля в корону с фотосферы в потенциальном приближении. На основании выполненного анализа сделан вывод, что наблюдаемый псевдо КВМ мог быть взрывной волной, вызванной импульсным выделением энергии сопутствующей солнечной вспышки. Также показано, что в ограниченном диапазоне высот $\approx 0.2-0.5R_S$ (R_S – радиус Солнца) в короне фронт этой взрывной волны был ударным фронтом. Полученные результаты демонстрируют, что не все события из каталога КВМ SOHO LASCO являются настоящими выбросами массы. По крайней мере, в некоторых событиях наблюдаемые псевдо КВМ могут являться взрывными волнами.

СРАВНЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕНЕРАЦИИ КВМ, ДВИЖУЩИХСЯ В ПОЛЕ ЗРЕНИЯ КОРОНОГРАФОВ LASCO С БОЛЬШОЙ И С МАЛОЙ СКОРОСТЬЮ

Загайнова Ю.С.¹, Файнштейн В.Г.², Мышьяков И.И.²

1 - ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе 4, Россия, yuliazagainova@mail.ru

2 - ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, а/я-291, Россия

Настоящая работа направлена на получение ответа на следующий вопрос: существуют ли принципиальные различия в генерации регистрируемых в поле зрения коронографов LASCO корональных выбросов массы (КВМ) с большой скоростью и с маленькой скоростью? К КВМ с большой скоростью условно были отнесены выбросы массы, линейная проекционная скорость которых в поле зрения LASCO составляет $V_{lin} > 1500$ км/с, к медленным – $V_{lin} \leq 600$ км/с. Для ответа на этот вопрос мы отобрали две группы быстрых и медленных КВМ типа гало с источниками в пятенных группах, удалённых от центра солнечного диска не более, чем на 60° . Для анализа использовались данные телескопов SDO/AIA и инструмента SDO/HMI, а также коронографов LASCO C2 и C3.

Сопоставлены свойства активных областей, в которых возникли быстрые и медленные КВМ. Выполнена качественная оценка вклада эрупции волокон или, в общем случае, магнитных жгутов, в процесс генерации КВМ из двух групп. Сопоставлены морфологические особенности формирования двух групп отобранных выбросов массы по наблюдениям в линиях крайнего ультрафиолета. Обсуждаются особенности кинематики фронтальной структуры быстрых и медленных выбросов массы. С использованием векторных измерений фотосферного магнитного поля инструментом SDO/HMI над областями формирования КВМ в нелинейном бессиловом приближении рассчитаны распределения магнитного поля с высотой. Анализ этих распределений показал, что до начала связанной с КВМ вспышки быстрота изменения поля с высотой над местом генерации КВМ заметно отличается для быстрых КВМ по сравнению с медленными выбросами массы.

БАЛЬМЕРОВСКИЙ ДЕКРЕМЕНТ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕР ЗВЁЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА

Белова О.М., Бычков К.В.

Физический факультет и ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, whitecanvas05122010@mail.ru

Вычислены потоки в эмиссионных линиях водорода при нестационарном высвечивании газа, нагретого на фронте плоской стационарной ударной волны. Начальные условия соответствуют атмосферам карликовых G–M звёзд. Температура газа взята в диапазоне (2700÷6000) K, концентрация частиц — $(10^{11} \div 10^{14}) \text{ см}^{-3}$, скорость фронта ударной волны — (20÷100) км/с., компонента магнитного поля перпендикулярная скорости — (1÷2) Гс. Учитывался следующий набор химических элементов: H, He, C, N, O, Mg, Si, S, Ca и Fe. Число уровней атома водорода принято равным 10÷15, в соответствии с критерием Инглиса–Теллера для карликов. Принято во внимание различие между температурами атомно–ионной и электронной компонент. В уравнения задачи включены следующие процессы: обмен энергией между атомами/ионами и электронами при упругих соударениях, а также неупругие f–f, f–b и b–b ударные и радиационные переходы. Учитывались фотоионизация и фотовозбуждение фотосферным излучением, вынужденные процессы фоторекомбинации, тормозного излучения и свечения в линиях дискретных переходов. Излучение фотосферы рассматривалось как чернотельное (2800÷6000 K) с фактором диллюции равным 1/2. Расчёт рассеяния в линиях проводился в рамках модели Бибермана–Холстейна для доплеровского контура.

Показано, что по потокам излучения в эмиссионных линиях водорода можно судить о мощности вспышки.

Выражаем благодарность за финансовую помощь Программе поддержки Ведущих научных школ МГУ им. М.В.Ломоносова.

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ В МИКРОВСПЫШКЕ НА СОЛНЦЕ

Накаряков В. М., Анфиногентов, С., Стороженко А. А., Курочкин Е. А., Богод В. М., Шарыкин И. Н., Кальтман Т. И.

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

Исследование маломощных ("микровспышечных") процессов в атмосфере Солнца мотивируется их рассмотрением в качестве вероятного механизма нагрева плазмы. В то же время слабость генерируемого микровспышками излучения существенно ограничивает возможность их изучения методами, используемыми для более мощных вспышек. По данным РАТАН-600 и космических аппаратов RHESSI и SDO проведен анализ тонкой временной структуры излучения в солнечной микровспышке В-класса (SOL2017-01-25T10:15), 25-го января 2017 года в активной области 12,628. Найдены квазипериодические пульсации радиоизлучения с периодами 1.4 с (в интенсивности в диапазоне 3-4 ГГц, а также в правой и левой круговых поляризациях) и 0.7 с в поляризации радиоизлучения. Свойства модулированного данными пульсациями радиоизлучения, геометрия вспышечной области (меридиональное расположение оснований вспышечной петли) и спектр сопутствующего рентгеновского излучения позволяет интерпретировать данные пульсации как проявление фундаментальной и второй пространственных параллельных гармоник сосисочных быстрых магнитоакустических колебаний вспышечной петли, что открывает возможность сейсмологического исследования микровспышек..

1. Nakariakov, V.M., Anfinogentov, S., Storozhenko, A.A., Kurochkin, E.A., Bogod, V.M., Sharykin, I.N., Kaltman, T.I., [Quasi-periodic pulsations in a solar microflare](#), *Astrophys. J.* **859**, 154, 2018

О НЕСТАЦИОНАРНЫХ СВОЙСТВАХ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ПУЛЬСАЦИЙ ВСПЫШЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Куприянова Е.Г., Кашапова Л.К., Брумол А.-М., Колотков Д.Ю., Кудрявцева А.В.

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

Одним из неотъемлемых свойств вспышечного энергосвечения являются квазипериодические пульсации (КПП), наблюдаемые на различных фазах солнечной вспышки практически во всех диапазонах электромагнитного спектра (от гамма-лучей до радиоволн). Более того, последнее время стали появляться свидетельства присутствия в солнечных и звёздных вспышках КПП с нестационарными, меняющимися во времени, параметрами. Под нестационарностью понимаются отклонения от гармонического сигнала, например, непрерывный дрейф периода, модуляция амплитуды и периода, "цуговая" природа сигнала, различные формы тренда и присутствие шумов различной природы. Нестационарность параметров КПП может быть обусловлена как наложением нескольких мод с близкими периодами, так и быть связана с реальными изменениями параметров источника излучения во время вспышки. Оба класса представляют практический интерес с точки зрения развития методов диагностики механизмов генерации КПП, что даёт возможность приблизиться не только к качественному пониманию происходящих процессов, но и к их количественному описанию. В докладе анализируются солнечные вспышки, относящиеся к этим двум классам нестационарности. Используются данные Сибирского радиогелиографа (SRH) и Широкополосного микроволнового спектропляриметра (BBMS) в п. Бадары, а также RSTN, GOES и RHESSI.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проекты № 17-52-10001 (КЕГ, КЛК, КАВ) и № 18-02-00856 (КЕГ).

СОЛНЕЧНОЕ ДИНАМО В КОНТЕКСТЕ ЗВЕЗДНЫХ ДИНАМО И ПРОБЛЕМА СУПЕРВСПЫШЕК

Соколов Д.Д.

МГУ и ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, sokoloff.dd@gmail.com

Сравнительно недавно обработка наблюдений, полученных миссией Кеплер, выявила наличие на некоторых звездах, похожих на Солнце, супрвспышек, т.е. событий, напоминающих солнечные вспышки, но превосходящие их по энергетике на несколько порядков. Если нечто подобное случилось бы на Солнце, то нас ожидали бы серьезные и неприятные последствия, хотя вопрос о том, каковы бы они были конкретно, требует дополнительных исследований. Имеющиеся данные о солнечных вспышках говорят о том, что ничего подобного на Солнце в обозримом прошлом не происходило, а с точки зрения солнечного динамо не видно, как именно можно запасти на Солнце магнитную энергию, достаточную для появления супервспышки. Все это приводит к мысли о том, что сравнительно небольшие изменения параметров солнечного динамо могут привести к образованию магнитных конфигураций, энергия которых много больше солнечной магнитной энергии. Это представление заставляет по-новому взглянуть на многие вопросы солнечного динамо и сопоставления динамо-моделей с наблюдениями, которые ранее не привлекали внимания исследователей.

О СУПЕРВСПЫШКАХ НА ЗВЁЗДАХ-ГИГАНТАХ

Кацова М.М.¹, Кичатинов Л.Л.^{2,3}, Мосс Д.⁴, Олах К.⁵, Соколов Д.Д.^{6,7}.

¹ Государственный астрономический ин-т им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, maria@sai.msu.ru

² Институт солнечно-земной физики, г. Иркутск, Россия

³ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴ Университет Манчестера, г. Манчестер, Великобритания

⁵ Обсерватория Конколи, Исследовательский центр по астрономии и наукам о Земле, г. Будапешт, Венгрия

⁶ МГУ им.М.В. Ломоносова, г.Москва, Россия

⁷ ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, г.Троицк, Москва, Россия

Космическим телескопом Kepler зарегистрированы очень мощные вспышки на некоторых звёздах спектральных классов F, G, K и M. Эти явления значительно сильнее солнечных вспышек. Даже небольшая вероятность появления таких событий на Солнце представляет опасность для современного высокотехнологичного общества. Сопоставимая по энергетике вспышка наблюдалась с Земли у компонента двойной системы типа RS CVn – звезды HK Lac 24–25 сентября 1989 г. В отличие от звёзд, наблюдавшихся миссией Kepler, для этой звезды получены параметры закона вращения. Дифференциальное вращение K0-гиганта HK Lac оказывается анτισолнечным. Для такого вращения вместо волн магнитной активности с дипольной симметрией модели динамо дают квазистационарные магнитные конфигурации с квадрупольной симметрией. Магнитная энергия таких конфигураций обычно примерно на два порядка выше магнитной энергии, связанной с волнами активности. По-видимому, этот же механизм может обеспечить энергию супервспышек на звёздах поздних спектральных классов.

ДВЕ ФАЗЫ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК: УСКОРЕННЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ И ПРОТОНЫ

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

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

Солнечные протонные события 4-10 сентября 2017 года вновь сделали актуальной гипотезу о реализации в солнечных вспышках двух фаз ускорения заряженных частиц, когда в первой фазе ускоряются электроны <100 кэВ, а во второй фазе – электроны >100 кэВ и протоны [1-3]. По всей видимости, в этих событиях по данным SOHO/EPHIN (релятивистские электроны) и ACS SPI(жесткое рентгеновское излучение и релятивистские протоны) впервые удалось разделить вблизи Земли популяции электронов и протонов, ускоренные в различных фазах вспышек [4]. Ранее о распространении в межпланетной среде двух популяций частиц косвенно свидетельствовали «электронные» и «протонные» события, обнаруженные статистически [2, 5].

Имеющиеся у нас в настоящий момент наблюдательные данные по 10 мощным протонным событиям 2006-2017 годов свидетельствуют о реализации сценария, приведенного ниже. Процесс ускорения в солнечных вспышках длительный и непрерывный, электроны и протоны могут быть ускорены как в первой, так и во второй фазе, максимальную энергию частиц определяют энергетические потери за счет синхротронного излучения [6]. Частицы, ускоренные во всех фазах солнечных вспышек, могут наблюдаться в межпланетном пространстве при благоприятных условиях выхода. В первой фазе энергия ускоренных протонов мала для возможности их регистрации на Солнце. Во второй фазе электроны достигают максимально возможной энергии, их продолжающееся ускорение приводит к ужесточению спектра. Энергия же протонов увеличивается постепенно и может достичь во второй фазе величин достаточных для их обнаружения по гамма-излучению.

За условный нулевой момент времени во всех рассмотренных событиях может быть принято начало радиоизлучения на 15.4 ГГц (сеть RSTN), для генерации которого необходимы релятивистские электроны. Данные RSTN показывают, что вторая фаза вспышек развивается в нижней короне и выше. Подъем области ускорения в корону является необходимым условием для развития второй фазы, так как обеспечивает меньшие энергетические потери благодаря меньшим величинам магнитного поля.

1. Wild J. P., Smerd S. F., Weiss A. A. // Ann. Rev. Astron. Astrophys 1963. V. 1. P. 291.
2. Ramaty R., Colgate S. A., Dulk, G. A. et al. // Proc. the 2nd SKYLAB Workshop on Solar Flares. 1978. P. 117.
3. Shih A. Y., Lin R. P., Smith D. M. // ApJ 2009. V. 698. P. L152.
4. Григорьева И.Ю. и Струминский А.Б. // Труды XXII Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца. ГАО РАН. 2018. С. 123.
5. Cane H. V., Richardson I. G., von Rosenvinge T. T. // JGR 2010. V. 115. P. A08101.
6. Svestka Z. // Solar Phys. 1970. V. 13. P. 471.

СОПОСТАВЛЕНИЕ НАЧАЛА НАЗЕМНОГО ВОЗРАСТАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ИЗМЕРЕНИЯМИ НЕЙТРАЛЬНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ЭРУПТИВНОГО СОБЫТИЯ 10 СЕНТЯБРЯ 2017 Г.

**Юшков Б.Ю.¹, Курт В.Г.¹, Белов А.В.², Кудела К.³, Мавромикалаки Е.⁴,
Кашапова Л.К.⁵, Сгуропулос К.⁴**

¹ *НИИЯФ МГУ (clef@srd.sinp.msu.ru)*

² *ИЗМИРАН*

³ *Институт экспериментальной физики Словацкой АН*

⁴ *Национальный университет, Афины, Греция*

⁵ *ИСЗФ СО РАН*

Представлены основные характеристики наземного возрастания солнечных космических лучей (GLE72), ассоциированного с мощной эруптивной солнечной вспышкой 10 сентября 2017 г. (X8.2, S06W88). По данным нейтронных мониторов и прибора NEPAD (ИСЗ GOES 13) первые частицы достигли Земли в 16:06–16:08 UT. Исследовано временное поведение нейтральных излучений, измеренных в широком диапазоне длин волн, в частности, высокоэнергичного γ -излучения (детектор *Fermi/LAT*), генерируемого при распаде пионов, рожденных протонами, ускоренными до энергий ≈ 1 ГэВ. Основное энергосодержание вспышки, а также наиболее интенсивное ускорение субрелятивистских протонов наблюдалось в 15:58–16:02 UT. В это время источник высокоэнергичного γ -излучения был локализован в области вспышки. В это же время наблюдалось формирование токового слоя после эрупции вещества. Данные измерений согласуются с моделью ускорения частиц до субрелятивистских энергий в пересоединяющемся турбулентном токовом слое, при этом не выявлено синхронизации динамики CME с началом регистрации частиц на 1 а.е. Предположив, что ускоренные частицы вышли в межпланетное пространство сразу после ускорения, мы оценили длину их пролета как 1.5 ± 0.3 а.е. по разности времени ускорения протонов на Солнце и их прихода на Землю.

О ПОЛОЖЕНИИ ИСТОЧНИКА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПИОННОГО РАСПАДА В ЗАЛИМБОВОМ СОБЫТИИ 1 СЕНТЯБРЯ 2014 г.

В.И. Киселёв¹, В.В. Гречнев¹, А.А. Кочанов¹, А.М. Уралов¹

¹*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, valentin.kiselev@iszf.irk.ru*

При залимбовой эруптивной вспышке 1 сентября 2014 г. со стороны Земли наблюдалось длительное гамма-излучение пионного распада > 100 МэВ, возникающее при взаимодействии протонов > 300 МэВ с веществом. Наблюдавшиеся со стороны Земли гамма-излучение, жёсткое рентгеновское и радиоизлучение были намного продолжительнее жёсткого рентгеновского всплеска в области вспышки, зарегистрированного детектором HEND со стороны Марса. Ackermann et al. (2017, ApJ, 835, 219) показали соответствие спектра гамма-излучения распаду пионов и нашли положение эффективного центра гамма-излучения (ЭЦГИ) на восточном лимбе вдали от гиротронного источника (ГС), бывшего и наиболее вероятным источником жёсткого рентгеновского и гамма-излучения. Смещение положения ЭЦГИ относительно ожидаемого в области ГС возможно из-за вклада вторичных гамма-квантов пониженных энергий, порождённых в корональных структурах. Мы вычислили положения ЭЦГИ по данным Fermi/LAT. Повышение пороговой энергии от 100 МэВ до 300 МэВ значительно смещает положение ЭЦГИ в сторону ожидаемого. Различие длительностей второго пика жёсткого рентгена вспышки по HEND, и наблюдавшегося со стороны Земли длительного гиротронного, гамма-излучения и жёсткого рентгена объяснено захватом и удержанием частиц в петлях короны. Смоделированное излучение частиц в ловушке близко к реальному. Работа выполнена за счет средств российского научного фонда (проект № 18-12-00172).

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СОБЫТИЙ СКЛ И ИХ СОЛНЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Кашапова Л.К.(1), Митева Р.(2), Мягкова И.Н. (3), Богомолов А.В.(3),
И.И. Мышьяков(1), Ц. Цветков(4).

(1) *ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, ikk@iszf.irk.ru*

(2) *ИКИТ БАН, г. София, Болгария*

(3) *НИИФ МГУ, г. Москва, Россия*

(4) *ИА и НАО БАН, г. София, Болгария*

Наибольший интерес при изучении связи солнечных явлений с характеристиками потоков и спектров заряженных частиц в событиях в солнечных космических лучах (СКЛ) вызывают факторы, приводящие к ускорению протонов СКЛ до высоких энергий. Основное вопрос: каким механизмом и где происходит ускорение частиц – во время вспышек в атмосфере Солнца или на ударных волнах корональных выбросов

Мы представляем результаты попытки учета особенностей топологии магнитного поля в активных областях, где произошли солнечные вспышки на примере результатов двух исследований. В одном из них для одной активной области (АО 10069) был проведен сравнительный анализ параметров, характеризующих ускорение и распространение ускоренных электронов в солнечных вспышках с относительным избытком потоков протонов относительно потоков электронов в событиях СКЛ. Были использованы параметры, полученные из наблюдений в рентгеновском, микроволновом и метровом радио диапазонах, а также проекции скорости корональных выбросов на картинную плоскость. Задачей исследования было проверить – насколько полученные результаты согласуются с тем, что получено в результате статистических исследований.

Во время другого исследования, мы провели сравнение параметров характеризующих процессы ускорения для двух близких по мощности солнечных вспышек, но ставших источниками разных по интенсивности потоков протонов событий СКЛ. При этом величины основных показателей вспышки (класс, локализация на диске), обычно используемых при статистических исследованиях, у этих двух событий были близки. В качестве дополнительного фактора, были привлечены результаты восстановления трехмерной структуры активных областей.

Результаты обоих исследований привели нас к выводу, что топология магнитного поля активных областей является важным фактором не только для ускорения частиц во время солнечных вспышек. Также она является фактором, который либо способствует, либо, наоборот, препятствует выходу ускоренных на Солнце частиц в межпланетное пространство, тем самым влияя на мощность солнечных протонных событий, наблюдаемых на орбите Земли.

Кашапова Л.К. благодарит грант Российского научного фонда (проект № 18-12-00172) за финансовую поддержку.

ОГРАНИЧЕНИЕ НА МЕХАНИЗМЫ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ ИЗ МИКРОВОЛНОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Ковалев В.А.¹, Мельников В.Ф.²

¹- ИЗМИРАН, г.Троицк, г. Москва, Россия, vic.kov@yandex.ru

²- ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Теоретические модели вспышек предсказывают разные сценарии ускорения заряженных частиц. В частности, возможны разные режимы энергизации плазмы (нагрева и /или ускорения частиц): экспоненциальный, сверхэкспоненциальный (режим с обострением) и замедленный. Исследование динамики параметра $H(t)=dF(t)/F(t)dt$, где $F(t)$ – плотность потока микроволнового излучения на избранной частоте, способствует выбору сценария ускорения и модели вспышки. В данной работе исследована фаза роста потока излучения ряда микроволновых импульсных всплесков, зарегистрированных на фиксированных частотах в обсерватории Нобеяма. Исследование проведено для высокочастотной ($f > f_{max}$) части микроволнового спектра, где радиоисточник является оптически тонким, а поток излучения пропорционален общему числу среднерелятивистских электронов.

Из анализа эволюции инкремента нарастания радиопотока установлено, что чаще всего нарастание происходит в два этапа. На первом наблюдается кратковременный «сверхэкспоненциальный» режим роста, а на втором, основном, рост происходит в замедленном, по сравнению с экспоненциальным законом, режиме. В результате детального анализа показано, что первоначальный «сверхэкспоненциальный» режим роста обусловлен влиянием «фона», то есть, относительно низкого потока от предыдущего импульса излучения. После того как поток существенно превысит уровень «фона», его возрастание происходит в замедленном режиме. В итоге, сделан вывод о реализации в наблюдаемых солнечных вспышках только замедленных механизмов ускорения электронов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 17-02-00308, 17-52-80064, и РНФ № 16-12-10448.

**УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ДО РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЙ
КВАЗИСТАЦИОНАРНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ СОЛНЦА В НИЖНЕЙ
АТМОСФЕРЕ**

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

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

ГАО РАН, Санкт-Петербург

Проведен сравнительный анализ ускорения электронов электрическими полями до релятивистских энергий в условиях фотосферы/хромосферы и нижней короны Солнца. Показано, что в нижней атмосфере эффективное поле Драйсера на несколько порядков превосходит драйсеровское поле в короне. При этом определяющую роль в торможении нетепловых электронов играют неупругие столкновения с атомами. Сделан вывод в пользу пренебрежимо малого влияния размножения вторичных электронов, возникающих в результате ионизации водородной плазмы, на убегающие электроны, которые могут ускоряться до релятивистских энергий. Ускорение электронов в нижней атмосфере Солнца позволяет объяснить как наблюдаемую корреляцию между временными профилями континуума и жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек, так и локализацию рентгеновских источников на уровне нижней хромосферы и верхней фотосферы Солнца. Рассмотрены возможные механизмы генерации электрических полей в солнечной атмосфере.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РНФ 16-12-10448 и РФФИ 18-02-00856-а.

О ТОНКОЙ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЕ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК: НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, y.charikov@yandex.ru

Современные исследования временной структуры жесткого рентгеновского излучения во время солнечных вспышек на спутниках SMM, YOHKOH, BATSE, КОРОНАС, RHESSI свидетельствует о наличии импульсов излучения длительностью в сотни мс. Наиболее вероятно, что подобная структура отражает импульсный характер ускорения электронов, процесс их распространения и излучения в магнитоактивной плазме вспышечных петель. Не рассматривая возможные механизмы ускорения электронов, приводящие к такой временной структуре, будем полагать, что в момент инжекции электронов в плазму замкнутой вспышечной петли временная зависимость функции распределения представляет ряд импульсов с длительностью сотни мс, непрерывно следующих друг за другом. На основе решения кинетического уравнения Фоккера – Планка исследуется динамика подобного пучка в плазме с заданным распределением магнитного поля и концентрацией частиц вдоль магнитной петли. Рассматриваются различные модели пучка и плазмы, рассчитаны поток и поляризация жесткого рентгеновского излучения. Основное внимание обращается на возможность генерации тонкой временной структуры излучения в локальных областях магнитной петли – оснований и вершины. В предположении инжекции ускоренных электронов в вершине петли с малой концентрацией плазмы ($n < 10^{10} \text{ см}^{-3}$) жесткое рентгеновское излучение с субсекундной временной структурой возникает в основаниях петли при распространении ускоренных электронов вдоль магнитного поля в плазму, концентрация которой достаточно высока (10^{13} см^{-3} и более). Таким образом, регистрация мс-секундной временной структуры ЖРИ ограничивает параметры модели пучка и плазмы. Кроме того, существенным для обеспечения величины потока и тонкой временной структуры рентгеновского излучения является пичч-угловое распределение электронов, которое в момент инжекции пучка должно быть существенно анизотропным $\cos^{12}(\alpha)$, а магнитное поле с малым отношением $B_{\text{max}}/B_0 \sim 2$. Согласно кинетическим расчетам наличие временных структур длительностью $< 1 \text{ с}$ в области вершины петли носят шумовой характер.

ФОРМИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВИСТЛЕРОВ ВО ВСПЫШЕЧНОЙ ПЕТЛЕ С НЕТЕПЛОВЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

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 турбулентность вистлеров во вспышечной петле может быть образована в результате нестационарного вспышечного энерговыведения в процессе конвертации сгенерированных БМЗ волн в вистлеры с частотами от протонной до электронной гирочастоты. Ускоренные при энерговыведении нетепловые электроны, захваченные в магнитной ловушке, взаимодействуют с вистлерами через механизм резонансного взаимодействия. При этом происходит деформация как спектра вистлеровской турбулентности, так и энергетического, питч-углового и пространственного распределений нетепловых электронов, генерирующих излучение в радио и рентгеновском диапазонах. Учитывая возможность наблюдения излучения вспышки с большим пространственно-временным разрешением, становится актуальным проведение модельных оценок и расчетов процесса нестационарного формирования турбулентности и ее влияния на распределение быстрых электронов.

В предлагаемой работе рассматривается модель формирования слабой турбулентности в плазме вспышечной петли как широкополосного пакета вистлеровских волн со случайными фазами и распространяющимися квазипродольно вдоль магнитного поля петли. Согласованное взаимодействие волн и нетепловых электронов описывается моделью квазирезонансного взаимодействия, справедливой при медленных (по сравнению с плазменной частотой) изменениях по времени функций распределения электронов по фазовым координатам (положение в петле, питч-угол и энергия) и плотности энергии вистлеров по частотам. При этом учитываются процессы переноса и диффузии электронов, обусловленные неоднородным магнитным полем петли и полем волны. Магнитное поле петли и концентрация фоновой плазмы заданы и постоянны во времени. Закон нестационарной инжекции нетепловых электронов в петлю по фазовым переменным и времени так же считается заданным. В рамках указанной модели исследуются такие важные для понимания физики излучения петли процессы как взаимодействие на прямом и обратном эффекте Доплера, динамика декремента затухания вистлеров и спектра турбулентности после вспышечного энерговыведения. Исследуется рассеяние нетепловых электронов в конус потерь за счет питч-угловой диффузии, особенности кинетики электронов и волн в различных точках петли (вершина, ноги и основания).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСКОРЕННЫХ
ЭЛЕКТРОНОВ В СИСТЕМЕ МАГНИТНЫХ ПЕТЕЛЬ ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ 23
СЕНТЯБРЯ 2014Г.**

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

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

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

Исследовано вспышечное событие SOL23-09-2014T23:11, GOES-класс M2.5. По данным HMI/SDO в приближении NLFFF восстановлена структура магнитного поля в короне активной области. Структура магнитного поля представляет собой систему магнитных петель, довольно сложной конфигурации. Детально исследованы радио (Nobeyama Radioheliograph) и рентгеновские (RHESSI) карты излучения и энергетические спектры, их временная и пространственная эволюция с наложением источников излучения на структуру магнитного поля. Проведено моделирование распространения ускоренных электронов в нескольких характерных магнитных структурах вспышечной аркады. Подобраны функции инжекции ускоренных электронов, зависящие от координаты вдоль магнитной петли, питч-угла и энергии, которые позволили качественно и количественно согласовать данные наблюдений с результатами моделирования таким образом, чтобы рассчитанные параметры излучения соответствуют наблюдаемым распределениям яркости жесткого рентгеновского излучения в диапазоне 28 – 135 кэВ и гиротронного излучения 1 – 35 ГГц. Энергетический спектр пучка электронов при этом соответствовал двух степенной функции с показателями спектра в диапазонах $\delta_1 \approx 4.5-6.5$, $\delta_2 \approx 2.0-2.4$, и энергией излома спектра $E_{br} \approx 150-300$ кэВ, в зависимости от конкретной магнитной структуры. Питч-угловое распределение ускоренных электронов при этом представляет собой анизотропный поток электронов с углом раствора $\sim 80^\circ$ из вершин магнитных петель в направлении основания с доминирующим жестким рентгеновским источником.

АКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ И СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ В МИНИМУМАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

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

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

Солнечная активность имеет периодичность на различных временных масштабах (от 158 дней до тысячелетий). В качестве показателя солнечной активности чаще всего используется относительное число солнечных пятен (число Вольфа). Один из наиболее ярко выраженных — одиннадцатилетний цикл активности. В целом число вспышек на Солнце и другие индексы солнечной активности очень хорошо коррелируют с числом Вольфа, однако, отдельная активная область, дающая мощные вспышки X класса в мягком рентгеновском диапазоне, может наблюдаться на любой фазе цикла солнечной активности, включая минимумы. Такое резкое увеличение числа солнечных вспышек имело место в минимумах предыдущих солнечных циклов, равно как и на спаде 24-го солнечного цикла, в сентябре 2017 года.

Комплексный анализ таких мощных вспышек в минимуме активности до настоящего времени не проводился, и вопросы о том, является ли возникновение таких вспышек случайным или закономерным явлением именно на спаде циклов, сходны ли предпосылки их возникновения для всех циклов, какие наблюдательные свойства излучения в различных диапазонах совпадают, а какие отличаются, остаются открытыми.

Мы представляем анализ структуры и динамики активных областей июля 1996 г., декабря 2006 г. и сентября 2017 г., породивших мощные вспышки X-класса в минимумах 22го, 23го и 24го солнечных циклов соответственно, и проводим их сравнение.

Данная работа поддержана грантом РФФИ 18-32-00439 мол_а.

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА И ВСПЫШЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

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

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

²НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

Представлены два случая (NOAA 12242, 17 декабря 2014 г., и 12673, 4 сентября 2017 г.) усиления мощности колебаний микроволнового излучения активных областей (АО) Солнца перед вспышками.

В АО NOAA 12242 примерно за 40-50 минут до вспышки M1.5 наблюдалось усиление мощности колебаний микроволнового излучения с периодом чуть больше 10 минут. В тот же день примерно за 60 минут до вспышки M8.7 наблюдалось усиление мощности 10-ти минутных колебаний. Обнаруженный эффект подобен выявленному ранее эффекту для 3-х минутных колебаний (Sych et al, Astron. Astrophys. 2009, **505**, 791; Abramov-Maximov, et al., Solar. Phys. 2011, **273**, 403), а именно, за 15-20 минут до радиовсплеска, сопровождающего вспышку, наблюдалось резкое увеличение мощности 3-х минутных колебаний. Эффект может быть интерпретирован как связь МГД-волн, распространяющихся вдоль силовой трубки пятна и началом солнечной вспышки.

В АО NOAA 12673 подобный эффект, но только для колебаний микроволнового излучения с более длинными периодами, наблюдался перед первой вспышкой М-класса 4 сентября 2017 г. Как минимум за 7 часов до первой вспышки М-класса, после которой началась сильная вспышечная активность в АО NOAA 12673, включая вспышки Х-класса, произошло появление или усиление мощности долгопериодических колебаний микроволнового излучения с периодами около 100 минут.

Работа выполнена в рамках Государственного задания (тема 0041-2019-0019), при частичной поддержке Программой Президиума РАН П-28.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА
ВБЛИЗИ НЕЙТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ ПО 135-
СЕКУНДНЫМ ВЕКТОРНЫМ МАГНИТОГРАММАМ НМИ**

Шарыкин И.Н., Зимовец И.В., Анфиногентов С.А., Мышьяков И.И.

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

В работе рассматривается солнечная вспышка M1.2 класса, произошедшая 15 марта 2015 г., сопровождавшаяся ускорением электронов и нагревом плазмы в закрученной магнитной структуре вдоль нейтральной линии (НЛ) магнитного поля. Цель работы состоит в исследовании динамики магнитного поля в импульсной фазе вспышки вблизи НЛ и места высыпания ускоренных электронов в плотные слои солнечной атмосферы. В работе используются новые векторные магнитограммы HMI/SDO со скважностью 135 с, которые позволяют произвести анализ динамики магнитного поля на временных масштабах импульсной фазы. Показано, что в процессе развития вспышечного энергосвечения произошло усиление горизонтальной компоненты магнитного поля и полного вертикального электрического тока вблизи НЛ. При этом наблюдался рост площади областей сильного тока, а средняя плотность тока при этом падала. Источники оптического и жесткого рентгеновского излучения располагались вблизи областей сильного горизонтального магнитного поля, сильного вертикального электрического тока градиента вертикальной компоненты магнитного поля (>1 кГс/Мм). Показано, что движение вспышечных лент, видимых в канале AIA/SDO 1600 Å, соответствует появлению новых областей сильного вертикального электрического тока. При этом, ленты входили в области с более вертикальным магнитным полем. Используя результаты экстраполяции магнитного поля в рамках бессилового приближения, удалось выявить резкий спад как свободной энергии ($\sim 35\%$), так и магнитной спиральности ($\sim 24\%$) в активной области во время солнечной вспышки. Оценки показывают, что скачок свободной магнитной энергии (2×10^{31} эрг) намного превышал полную энергию ускоренных электронов (10^{30} эрг) и максимальную внутреннюю энергию нагретой плазмы (3×10^{28} эрг). Показано, что силовые линии магнитного поля вблизи НЛ в процессе развития солнечной вспышки стали короче и ниже. Полученные наблюдательные данные по динамике магнитного поля и электрического тока связываются с проявлением магнитного пересоединения на уровне фотосферы.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТНОЙ СПИРАЛЬНОСТИ КАК ХАРАКТЕРИСТИКА СОЛНЕЧНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Степанов Р.А.¹, Кузанын К.М.², Otsuji, K.³, Sakurai, T.^{4,5}, Yokoi, N.⁶

¹*Институт механики сплошных сред, УрО РАН, ул. Королева 1, г. Пермь 614061, Россия*

²*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, 108840, Россия, г. Москва, kuzanyan@izmiran.ru*

³*Kyoto University and Hida and Kwasan Observatories, Kyoto, Japan*

⁴*National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo, Japan*

⁵*Earth-Life Science Institute of Tokyo Institute of Technology (Tokyo Tech University), Japan*

⁶*Institute of Industrial Sciences, University of Tokyo, Komaba, Tokyo, Japan*

Studies of Spatial Spectra of Magnetic Helicity become recently very motivating for confrontation of the results obtained from observational data and those from numerical simulations. The cascades of helicity over the scales of solar turbulence and comparative properties of magnetic energy may characterize and constrain physical mechanisms lying behind the turbulence in the Sun.

For achieving the highest available spatial resolution we have used Hinode SOT/SP data on sufficiently large active region vector magnetograms. We have looked at spatial spectra and various regimes of turbulent cascades. We found several ranges of scales at which the behaviour of turbulence is different:

1. Minimum reliably resolved range that corresponds to sub-granulation, or intra-network and inter-granulation scales [0.3-0.4Mm -- 1.5-2Mm] (the resolution limited short-scale end);
2. Solar “basic granulation”: from granulation – meso- granulation – super- granulation scales [1.5-2Mm -- 15-25Mm] (inertial range)
3. Maximum available scale of Active Region sizes: super- granulation – giant cell scales [15-25Mm -- 100-200Mm] (limited by FOV and curvature of the Sun -- projection effects)

Furthermore, to compare with some earlier results of other authors (Brandenburg et al. 2014; 2016) [1,2] we analyzed some cases of active regions with SDO HMI vector magnetograms.

We use advances of wavelet transform for scale analysis of magnetic energy and current helicity distributions in the solar active regions with significant coverage.

We show how spatial distributions of magnetic energy and current helicity differ at different scales. A special focus has been made on spatial scales of predominantly positive and negative signs of current helicity and its combination and cancellation. Inhomogeneity and local anisotropy are discussed.

Исследования на выполнены за счет гранта Российского Научного Фонда (проект РНФ 16-41-02012).

1. Zhang H., Brandenburg A., Sokoloff D. D., 2014, ApJ, 784, L45
2. Zhang H., Brandenburg A., Sokoloff D. D., 2016, ApJ, 819, 146

APPLICATIONS OF QUADRATIC HELICITY FOR NON-IDEAL MHD

P.M.Akhmet'ev, Diego Cirilo-Lombardo and Alexandr Yu. Smirnov.

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

Higher momenta of asymptotic linking numbers of magnetic lines was introduced by V.I.Arnold in [1]. The simplest example is the Quadratic helicity, an invariant for the ideal MHD. In the talk the local formula for the Quadratic helicity [2] is applied for Quadratic helicity flow, turbulent spectra and cosmological magnetic fields.

1. Arnold V.I. // The asymptotic Hopf invariant and its applications, Proc. Summer School in Diff. Equations, 1973 (1974), Erevan (in Russian); Sel. Math. Sov. 5, 327–345 (1986).
2. Akhmet'ev P.M., Candelaresi S. and Smirnov A.Yu // Physics of Plasmas, Vol.24, Issue 10 102128 (2017).

ВАРИАЦИИ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ДОЛГОЖИВУЩЕЙ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ

Андреева О.А., Малащук В.М.

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

В работе обобщены результаты исследования долгоживущей гигантской корональной дыры (ГКД) 2015-2017 года выполненные сотрудниками КрАО. Серия работ 2017-2018 гг. [1-7], посвящена исследованию эволюции и влиянию на околоземное пространство ГКД. ГКД появилась в июне 2015 года и в процессе своей эволюции занимала значительную часть северного полушария. Она просуществовала больше 2-х десятков кэррингтоновских оборотов (CR2165 - CR2188). Максимальная площадь, занимаемая ГКД составила $\sim 8 \cdot 10^{11} \text{ км}^2$ в короне и $\sim 6 \cdot 10^{11} \text{ км}^2$ на фотосфере. В максимуме своего развития ГКД распространилась до 30 градусов южной полусферы.

Исследования выполнены на основе наземных наблюдений на телескопе БСТ-2 (КрАО РАН) и спутниковых данных, полученных SDO (SDO/AIA, SDO/HMI) и ACE/SWEPAM, а также расчетов в потенциальном приближении по данным о магнитном поле SDO/HMI (PFSS). Авторы получили результаты анализа изменений таких эволюционных характеристик ГКД как площадь, интенсивность, скорость вращения, напряженность магнитного поля и магнитный поток. Эти результаты были использованы далее для сопоставления с параметрами солнечного ветра и дальнейшего изучения влияния ГКД на околоземную космическую погоду. Получены дополнительные указания, свидетельствующие о нерадиальном распространении быстрого солнечного ветра, что может приводить к значительным погрешностям при попытках прогнозирования его скорости на орбите Земли. Исследованы физические условия в ГКД по данным наблюдений в хромосферных линиях Na и He I 10830 Å.

1. Андреева О. А., Малащук В. М., Ахтемов З. С., Жигалкин Р. К. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2018. Т. 114. № 1. С. 129.
2. Андреева О. А., Малащук В. Конференция по физике Солнца «Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звёздах» 3–7 июня 2018 г. Сборник тезисов. Научный, 2018—С.48.
3. Андреева О. А., Малащук В.М. Конференция по физике Солнца «Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звёздах» 3–7 июня 2018 г. Сборник тезисов. Научный, 2018—С.32.
4. Ахтемов З.С., Перебейнос В.А., Штерцер Н.И. //Изв. Крымской Астрофиз. Обс. 2018.Т. 114, № 1, С.123
5. Ахтемов З. С., Цап Ю. Т., Малащук В. М., Штерцер Н. И. //Конференция по физике Солнца «Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звёздах» 3–7 июня 2018 г. Сборник тезисов. Научный, 2018.С.32.
6. Барановский Э. А., Гопасюк О. С., Штерцер Н. И. //Конференция по физике Солнца «Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звёздах» 3–7 июня 2018 г. Сборник тезисов. Научный, 2018.С.33.
7. Цап Ю. Т., Абраменко В. И., Малащук В. И., Борисенко А. В., Ахтемов З. С., Андреева О. А. // XXI Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца."Солнечная и солнечно-земная физика" 9-13 октября 2017». Труды конференции. Санкт-Петербург 2017. С. 365.

BULGARIAN SPACE INSTRUMENTATION INITIATIVE

Miteva R., Zaharinova M., Belichenova T., Mardirossian G.

Space Research and Technology Institute–Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,
rmiteva@space.bas.bg

We present a web-site of all Bulgarian space instrumentation starting from the first payload launched in 1972 to present day contribution to the Exo-Mars mission. Payloads, instruments and complex systems are organized chronologically, alphabetically and by science mission. The initiative aims to create an up-to-date source of information for the contribution of the Bulgarian scientists and engineers to space exploration. The background of the initiative [1] and the overall structure of the dedicated website [2] have been already presented elsewhere. Here we summarize the current status of the website: www.space.bas.bg/legacy

The initiative is supported by the Space Research and Technology Institute–Bulgarian Academy of Sciences.

1. Miteva R., Belichenova T., Zaharinova M., Mardirossian G., Getsov, P. // Proceedings of the Tenth Workshop 'Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere' 2018, held 4-8 June, 2018 in Primorsko, Bulgaria, Eds. K. Georgieva, B. Kirov and D. Danov, ISSN 2367-7570, P. 139.

2. Miteva R., Zaharinova M., Belichenova T., Mardirossian G. // Proceedings of the Fourteenth International Scientific conference "Space, Ecology, Safety – SES2018" 2018, held 7-9 November 2018 in Sofia, Bulgaria, Eds. P. Getsov, G. Mardirossian and Ts. Srebrova, ISSN: 2603-3321, P. 176.

INTERPLANETARY SOLAR RADIO EMISSIONS OBSERVED BY THE STEREO SPACECRAFT

KruparVratislav^{1,2,3}

1) Universities Space Research Association, Columbia, MD, USA

2) NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA

3) Institute of Atmospheric Physics CAS, Prague, Czech Republic

Type II and type III bursts are generally associated with solar eruptive events. Both are generated, via the plasma emission mechanism, when beams of suprathermal electrons interact with ambient plasma generating radio emissions. Type II bursts are triggered by electron beams accelerated at the shock fronts ahead of propagating CMEs, while type III bursts are a consequence of impulsively accelerated electrons associated with solar flares. Over the last decade, we have benefited from multipoint radio measurements obtained by the twin-spacecraft STEREO mission. I will discuss propagation effects of interplanetary type III bursts using STEREO observations and Monte Carlo simulations with a focus on scattering of radio signals by density inhomogeneities in the solar wind. Next, I will present results on interplanetary type II bursts. We found that faster CMEs are statistically more likely to be associated with the interplanetary type II radio bursts. We correlate frequency drifts of interplanetary type II bursts with white-light observations in order to localize radio sources with respect to a CMEs. Our results suggest that interplanetary type II bursts are more likely to have a source region situated close to CME flanks than close to CME leading edge regions.

MODULATIONAL INSTABILITY OF FAST SAUSAGE WAVES IN CORONAL LOOPS

Naga Varun Y., Mikhalyaev B.B

Kalmyk State University, Elista, Russia, naga.varuny@gmail.com

The phenomenon of the amplification of a perturbation in periodic wave propagation due to nonlinear effects is called as modulational instability or Benjamin-Feir instability. The advent of such an instability leads to an exponential rise of the perturbations which subsequently lead to the breakup of a wave front into wavelets or pulses. One can model such instability for moderate amplitude waves using nonlinear Schrödinger equation (NLSE). The Nonlinear Schrödinger Equation (NLSE) is a universal nonlinear equation which models the nonlinear evolution of a wave in an envelope approximation. The envelope embeds a primary linear carrier wave and three nonlinearly generated wave modes that interact with the original carrier wave and it is this four wave interaction that NLSE defines. Earlier such a NLSE for the fast sausage waves was obtained by us as a first step to explain the nonlinear behavior of these waves. While doing so we made use of ideal magnetohydrodynamic equations with an added low plasma pressure constraint and implemented the method of multiple scales. The obtained NLSE is as follows:

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

Here α is the nonlinear dispersive coefficient, β is the nonlinear coupling coefficient, V_g is the group velocity, f is the amplitude of the wave packet.

For the modulational instability to occur the fast sausage waves should exhibit anomalous group velocity. Although the advent of modulational instability is dictated by the amplitude, wave number and frequency of the plane periodic wave, we derive the following weak condition that if $\alpha\beta < 0$ then the possibility of an exponential rise in a perturbation is predominant. Also we show that one can classify modulation instability into three types which can be named as exponential modulational instability, conditional modulational instability and harmonic modulational instability.

This work is supported by the Russian science foundation grant (project no. 18-12-18000 and project no. 15-12-20001).

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ С КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ МАСС ТИПА «СТЕЛС»

Громов С.В.¹, Загайнова Ю. С.¹, Файнштейн В. Г.², Громова Л.И.¹

¹ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия, sgromov@izmiran.ru

²ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, а/я-291, Россия

Стелс-КВМ относят к небольшой, но особенной группе зарегистрированных КВМ, для которых отсутствует связанная с ними активность в нижней короне Солнца (вспышки, эрупции волокон, EUV волны и др.). Изучение некоторых стелс-КВМ показало, что они могут обладать заметной геоэффективностью, несмотря на относительно небольшую скорость в поле зрения коронографов. Но в целом, законченной картины отклика магнитосферы Земли на воздействие на нее стелс-КВМ до сих пор получить не удалось. В частности, практически отсутствуют сведения о суббуревой активности, вызванной стелс-КВМ.

В настоящей работе исследуются геофизические эффекты, обусловленные воздействием на магнитосферу нескольких стелс-КВМ с источниками на видимой стороне Солнца, для которых на орбите Земли удалось обнаружить связанные межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ). Во всех рассмотренных случаях МКВМ имели признаки магнитного облака. В основном, изученные события наблюдались в минимуме между 23 и 24 циклом солнечной активности. Исследованы особенности проявления стелс-КВМ в межпланетном магнитном поле (ММП) и солнечном ветре на орбите Земли. с целью их последующей систематизации. Показано, что воздействие анализируемых стелс-КВМ на магнитосферу Земли приводит к возрастанию суббуревой активности на фоне геомагнитных бурь малой интенсивности или их полного отсутствия, что прослеживается по изменению Dst-индекса. Для возникновения и развития геомагнитной активности на Земле необходимо, чтобы МКВМ содержали в себе заметную южную B_z компоненту ММП. На основе выявленных общих характеристик исследованных явлений планируется разработать каталог событий КВМ типа «Стелс».

ГЕОЭФФЕКТИВНЫЕ ВСПЫШКИ В 24 ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Якунина Г. В.

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

Солнечная активность тесно связана с эволюцией магнитных полей. Сравнительно небольшое уменьшение фоновых значений общего магнитного поля (МП) Солнца привело к уменьшению геоэффективности в 24 цикле. Число магнитных бурь значительно уменьшилось, особенно больших и средних. По данным WSO средняя фоновая величина общего МП уменьшилась более чем в два раза. Уменьшение фоновых значений общего МП Солнца привело к уменьшению геоэффективности, уровень которой стал меньше за счёт уменьшения числа геоэффективных солнечных вспышек, числа СПС и магнитных бурь. Величина индекса Ар-индекса была в марте 2012 (16,1), в марте 2015 (16,3), в сентябре 2015 (15,8). Максимум среднемесячных значений Ар-индекса (18,1) достиг в сентябре 2017 г.

Вспышка M8.7 произошла в активной области NOAA11402 (N28 W36) 23 января 2012 г. и сопровождалась двумя быстрыми CMEs ($\approx 1400 \text{ км s}^{-1}$ и $\approx 2000 \text{ км s}^{-1}$). Второй CME догнал первый на расстоянии $\approx 11\text{-}12 R_{\text{sun}}$. Взаимодействие CME могло быть ответственным за повышенный поток SEP. Взаимодействие CME привело к умеренной геомагнитной буре (Dst -73 нТл).

Первая большая геомагнитная буря (Dst < -200 нТл) в 24 цикле произошла 17 марта 2015 года. Полярные сияния 17 марта наблюдались в Москве и Подмосковье. Источник бури был связан с о вспышкой C9.1 (S22W25) 15 марта 2015 года. В 02:10 UT в этот день на SOHO / LASCO C3 зарегистрирован выброс корональной массы типа гало (CME). Начальная скорость этого CME $\sim 668 \text{ км/с}$.

Вторая по величине геомагнитная буря 24 цикла была связана с двумя вспышками M-класса из активной области NOAA 12371 21 июня 2015 года. Вторая из этих вспышек M была эруптивной, что привело к выбросу корональной массы (CME) типа гало со скоростью 1366 км/с и к геомагнитной буре с минимальным Dst = -204 нТл..

ДВЕ ФАЗЫ УСКОРЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ: НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА

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

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

Цель постера — представить имеющиеся в свободном доступе наблюдательные данные по 10 мощным солнечным вспышкам 2006-2017 годов, возможным источникам солнечных протонов и электронов в межпланетном пространстве. Эти данные являются дополнительным иллюстративным материалом для нашего устного доклада «Две фазы солнечных вспышек: ускоренные электроны и протоны» на этой конференции, их нужно рассматривать вместе.

Для систематизации излучения, регистрируемого в различных диапазонах за нулевой момент времени во всех рассмотренных событиях нами принято начало радиоизлучения на 15.4 ГГц (сеть RSTN), для генерации которого необходимы релятивистские электроны. Это время можно рассматривать, как условное начало второй фазы вспышек. Относительно выбранного нулевого момента построены временные профили рентгеновского (GOES, RHESSI, ACS SPI) и радио (RSTN) излучений, а также временные профили интенсивности протонов (GOES и ACS SPI) и электронов (SOHO EPHIN) различных энергий в межпланетном пространстве. Для оценки возможной роли корональных выбросов массы при ускорении и выходе энергичных частиц в межпланетное пространство рассмотрены наблюдения коронографа SOHO LASCO.

КАТАЛОГ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ 24 ЦИКЛА С УЧЕТОМ НАРУШЕНИЙ ЗАКОНОВ ХЕЙЛА И ДЖОЯ

Жукова А.В., Абраменко В.И., Куценко А.С., Жигалкин Р.К., Насырова А.М.

КрАО РАН, п. Научный, Россия, anastasiya.v.zhukova@gmail.com

При помощи данных инструмента HMI/SDO (участков магнитограмм SHARP серии sharp_cea_720s) рассчитан магнитный поток от активных областей (АО), находящихся на видимой солнечной поверхности в период с 07.06.2010 по 31.12.2017. Данные получены со скважностью 9 дней (трижды за каждый солнечный оборот). Всего отобрано 1614 АО с потоком не менее 10^{20} Мх, находящихся не далее 70° от центрального меридиана. Влияние проекции на величину магнитного потока откорректировано путем деления на косинус гелиоцентрического угла μ .

Области распределены по категориям по принципу соответствия теории глобального динамо среднего поля и известных свойств АО [1,2]:

А – правильные биполярные области, подчиняющиеся закону Хейла и закону Джоя, с лидирующим пятном, большим, чем основное последующее пятно;

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

U – одиночные пятна.

АО группы В были разбиты, в свою очередь, на меньшие подмножества в соответствии с выполнением указанных закономерностей благодаря наличию флагов Y («yes»), N («no») и Z («zero»), присвоенных по каждому из признаков «Хейл», «Джой», «лидер». АО группы U были разделены по принципу выполнения закона Хейла (как лидирующие пятна распавшихся биполярных областей). Происхождение одиночных пятен от пятен лидирующей или последующей полярности биполярных АО в установленных случаях учитывалось при помощи дополнительных флагов для признака «лидер»: P («preciding») и F («following»).

При установлении категории для каждой АО привлекались изображения в белом свете (данные сегмента continuum серии sharp_cea_720s инструмента HMI/SDO), учитывалось наличие петельных связей между пятнами различной полярности (данные инструмента AIA/SDO, полученные в свете линий Fe IX/X 171 Å и 193 Å), рассматривалась эволюция АО.

На базе полученных данных составлен каталог, почти полностью охватывающий 24-й цикл [3] с 07.06.2010 по 31.12.2017 и содержащий для каждой АО вычисленный нами магнитный поток, установленную категорию и необходимые технические данные. Для 668 АО, проявивших в рассматриваемый период заметную вспышечную активность, в каталоге представлены вспышечный индекс, время и класс максимальной наблюдавшейся вспышки. Для 416 АО представлены данные по оценке вертикальных электрических токов и токовой спиральности.

На основе каталога изучаются изменения магнитного потока от АО выделенных категорий с солнечным циклом [4], исследуется соотношение между глобальным динамо среднего поля и мелкомасштабным флуктуационным динамо для выяснения источников генерации магнитного поля Солнца.

Работа поддержана грантом РФФИ (Проект 18-12-00131).

1. Babcock, H.W. // *Astroph. Journ.* 1961. V. **133**, P. **572**.
2. van Driel-Gesztelyi L., Green L.M. // *Living Reviews in Solar Phys.* 2015. V. **12**. P. **1**.
3. Жукова А.В. // *Изв. КрАО* 2018. Т. **114**. С. **74**.
4. Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S. // *Geomagn. and Aeron.* 2018. V. **58**. P. **1159**.

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ RHESSI, KONUS-WIND

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

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, gvi1109@gmail.com

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В работе представлены результаты исследования квазипериодических пульсаций жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек с учетом пространственной локализации источников излучения по данным космического аппарата RHESSI, а также без учета пространственной локализации по данным Konus-Wind. Изучение квазипериодических пульсаций (КПП) жесткого рентгеновского излучения является дополнительным инструментом для диагностики физических параметров вспышечных областей, а также при выборе моделей ускорения и распространения пучков электронов. До сих пор не проводилось систематического исследования КПП по данным жесткого рентгеновского излучения из различных пространственных областей солнечной вспышки. Для выявления квазипериодических пульсаций во временных профилях вспышек были применены стандартные методы спектрального анализа - процедура вейвлетного преобразования и алгоритм быстрого преобразования Фурье. Оценка значимости пиков проводилась по методу Монте-Карло с моделированием исходных временных рядов красным шумом, наиболее адекватно соответствующим данным наблюдений. В работе рассмотрены несколько вспышек, в жестком рентгеновском излучении которых обнаружены квазипериодические пульсации. Характерной чертой всех исследованных событий является многообразие проявлений в свойствах квазипериодических пульсаций, соответствующих локальным источникам. Что касается свойств пульсаций жесткого рентгеновского излучения различных энергий из одного источника, то здесь для исследованных вспышек наблюдается различное поведение. Так, для события 13-05-2013 15:52 UT квазипериодические пульсации в анализируемых энергетических каналах преимущественно имеют несовпадающие характеристики, а для событий 21-04-2002 01:23 UT и 24-10-2003 02:50 UT - идентичные характеристики. Характерные периоды обнаруженных квазипериодических пульсаций составляют $P \sim 10-60$ с.

ЛОКАЛЬНАЯ ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СОЛНЕЧНУЮ КОРОНУ ИЗ ФОТОСФЕРЫ В БЕССИЛОВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ МАГНИТОФРИКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Вовченко И.В.¹, Зимовец И.В.¹, Кузанын К.М.², Накаряков В.М.³

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

²*ИЗМИРАН, Троицк, Москва*

³*University of Warwick, Coventry, UK*

В силу высокой температуры и низкой плотности солнечной короны, измерение магнитного поля в не представляются весьма проблематичным. Для определения поля в короне часто прибегают к бессилловому приближению. Имея измерения магнитного поля на уровне фотосферы (или в хромосфере), можно поставить краевую задачу по его экстраполяции в корону. Однако бессилловое приближение нелинейно и не имеет общего аналитического решения, поэтому приходится прибегать к численным методам.

В данной работе использован магнитофрикционный метод, заключающийся во введении фиктивной силы трения в систему уравнений МГД. Метод был апробирован на модельном поле типа аркады магнитных петель изатем применён к реальной активной области на фотосфере Солнца с использованием векторных магнитограммHMI/SDO.

Работа выполнена в рамках проекта “Сейсмология активных областей солнечной короны” программы Institutional Links Британского Совета № 277352569.

**МИКРОВОЛНОВЫЙ ИСТОЧНИК НАД НЕЙТРАЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ
ФОТОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В АО 12673, МАГНИТОГРАФИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ И ВСПЫШЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ**

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

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

²САО РАН, г. Нижний Архыз, Россия

По наблюдениям на РАТАН-600, радиогелиографе Нобеля и SDO выполнено исследование активной области Солнца 12673, в которой в сентябре 2017 г. произошли самые мощные вспышки 24-го цикла солнечной активности. Выявлены следующие признаки подготовки больших вспышек. Примерно за день до первой вспышки класса М наблюдается резкий рост градиента магнитного поля с последующими его локальными падениями перед вспышками; расстояние между областями максимальных магнитных полей противоположных полярностей сначала уменьшается, а затем начинает увеличиваться одновременно с возрастанием вспышечной активности; одновременно с этим происходит увеличение примерно на порядок интенсивности микроволнового излучения АО; интегральный спектр микроволнового излучения становится более крутым; степень поляризации на волне 3 см 4 сентября уменьшается по сравнению с 3 сентября. Изменения микроволнового излучения могут быть проинтерпретированы как развитие источника над нейтральной линией.

Работа выполнена в рамках Государственного задания (тема 0041-2019-0019), при частичной поддержке Программой Президиума РАН П-28.

НЕОСЕССИММЕТРИЧНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ПРАВИЛО ГНЕВЫШЕВА-ОЛЯ

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

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

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

Неосесимметричное распределение солнечной активности и фотосферных магнитных полей изучалось на основе данных по площади солнечных пятен (Greenwich USAF/NOAA, 1874 – 2016) и синоптических карт фотосферных магнитных полей Солнца, созданных Национальной Солнечной Обсерваторией Китт Пик (1976 – 2016). В качестве характеристики неосесимметричной компоненты солнечной активности было использовано понятие вектора долготной асимметрии. Для определения этого параметра использовался метод векторного суммирования, который позволяет для каждого кэррингтоновского оборота получить суммарный вектор активности с модулем, определяющим величину асимметрии, и фазой, указывающей на активную долготу. Модуль и фаза вектора долготной асимметрии в значительной мере освобождены от влияния стохастической (равномерно распределенной по долготе) компоненты распределения, подчеркивая отклонения от осесимметричности.

Для площади солнечных пятен величина долготной асимметрии изменяется с 11-летним периодом, однако в отличие от циклов солнечной активности амплитуды циклов асимметрии подчиняются особой закономерности изменения. Каждая пара из числа 12 – 23 циклов долготной асимметрии следует поочередно правилу Гневывшева – Оля (четный цикл ниже, чем следующий за ним нечетный) и анти-правилу Гневывшева – Оля (четный цикл выше, чем следующий за ним нечетный). Возможно, этот эффект – проявление 44-летнего периода в активности Солнца.

Показано, что локализация активной долготы для площади солнечных пятен изменяется как при смене полярностей глобальных магнитных полей (инверсия полярного поля), так и при смене полярностей локальных магнитных полей в минимуме солнечной активности. Максимум долготного распределения приходится на 180° для периода от минимума до инверсии и на $0^\circ/360^\circ$ для периода от инверсии до минимума.

Долготная асимметрия исследовалась отдельно для двух групп магнитных полей: сильных ($B > 50$ Гс) и слабых ($B < 5$ Гс). Магнитные потоки этих двух групп полей изменяются в противофазе. Локализация двух групп по долготе также противоположна. Для сильных полей активные долготы меняются так же как для солнечных пятен. Слабые поля концентрируются на диаметрально противоположных долготах. Однако величины долготной асимметрии как сильных, так и слабых полей следуют 11-летнему циклу солнечной активности.

Устойчивость локализации максимумов долготного распределения солнечных пятен и магнитных полей свидетельствует в пользу гипотезы о жестком вращении активных долгот.

О МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНЫХ (ЗВЕЗДНЫХ) ВСПЫШЕК

Григорьева И.Ю., Струминский А.Б.

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

Проблема максимальной энергии вспышек хорошо известна и актуальна в связи с наблюдением звездных вспышек с энергией более 10^{36} эрг на солнцеподобных звездах. Вопрос о минимальной энергии солнечных (звездных) вспышек, ввиду сильной зависимости от наблюдательных возможностей, с физической точки зрения практически не обсуждался. Возможным решением проблемы нагрева солнечной короны является ее нагрев за счет вспышек, но для этого необходимо знать их минимально возможную энергию $E_{\min}$. Здесь мы делаем оценки $E_{\min}$ из физических соображений, используя подход, развитый в [1] для звездных вспышек.

Рассмотрим вспышку, как процесс выделения энергии запасенной в структурах магнитного поля в хромосфере Солнца и выше, иными словами — в магнитосфере активной области. Для того чтобы образовывались магнитные структуры в короне, давление магнитного поля в фотосфере должно быть не меньше газового давления, то есть должно быть «равновесное» состояние магнитного поля B_0 (в фотосфере плотность энергии магнитного поля должна быть соизмерима с плотностью кинетической энергией плазмы). Помощь в определении $E_{\min}$ могут дать и ограничения на физические условия в плазме. Так, например, в нашем предположении полная минимальная энергия солнечной вспышки зависит от напряженности магнитного поля в единице минимального объема, который в свою очередь, определяется высотой верхней границы хромосферы $h=10-15$ тысяч км (минимальной высотой короны) и площадью S основания области выделения энергии на фотосфере. Здесь $S = \lambda^2$, где $\lambda = 100$ км — длина свободного пробега фотона в фотосфере, что и является реальным наблюдательным ограничением. В работе представлены оценки для $E_{\min}$ с учетом коэффициента пропорциональности $\beta \leq 1$, участвующего в определении значения магнитного поля $B = \beta B_0$ в области выделения энергии.

Работа, выполненная Григорьевой И.Ю. (ГАО РАН), частично поддержана программой фундаментальных исследований президиума РАН — Программа 28: «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

1. Садовский А.М., Струминский А.Б. и Белов А.В. // ПАЖ. 2018. Т. 44. С. 347.

О ПОТОКЕ ЭНЕРГИИ АЛЬВЕНОВСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА

Цап Ю.Т.^{1,2}, Степанов А.В.², Копылова Ю.Г.², Ханейчук О.В.³

¹*КрАО РАН, Крым, пгт Научный, yur_crao@mail.ru*

²*ГАО РАН, Санкт-Петербург*

³*Физико-технический институт КФУ им. В.И. Вернадского*

С учетом амплитудных и фазовых соотношений в приближении изотермической атмосферы рассмотрены особенности распространения альвеновских волн с периодами 10-300 с в фотосфере и хромосфере Солнца. Установлено, что амплитуда возмущенной скорости альвеновских волн с увеличением высоты в атмосфере увеличивается, тогда как амплитуда возмущений магнитного поля – падает. Разность фаз между этими величинами также зависит от высоты. Обсуждается проблема корректной постановки начальных и граничных условий в случае численных расчетов. Показано, что так называемые переходные точки и точки поворота [1] не имеют какого либо отношения к частоте отсечки и не могут характеризовать поток энергии альвеновских волн. Этот вывод хорошо согласуется с результатами работы [2] и свидетельствует о необходимости пересмотра метода исследования переноса волновой энергии, следующего из анализа осцилляционных теорем [3].

Работа частично поддержана грантами РФФИ 16-12-10448 и РФФИ 18-02-00856-а.

1. Perera H. K., Musielak Z.E., Murawski K. // MNRAS. 2015. V.450. P.3169.
2. Chae J., Litvinenko Y.E. // ApJ. 2018. V.869. P.36.
3. Musielak Z.E., Musielak D.E., Mobashi H. // PhRvE 2006. V.73. Id.036612.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗЫ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В СОБЫТИЯХ С ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫМ ГАММА - ИЗЛУЧЕНИЕМ

Минасянц Г.С.¹⁾, Минасянц Т.М.¹⁾, Томозов В.М.²⁾

¹⁾ АФИФ НАН РК, г.Алматы, Казахстан, gennadii_minasya@mail.ru

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

Рассмотрены характеристики эволюции шести вспышечных событий, в импульсной фазе которых зарегистрированы потоки гамма - излучения с энергиями квантов >100 МэВ (LAT Fermi). Подтверждена наиболее вероятная картина процесса возникновения высокоэнергичных гамма-квантов. Эффективное ускорение частиц, возникающих в результате вспышечного энерговыделения (при диссипации токового слоя), происходит при их взаимодействии с фронтом ударной волны коронального выброса массы, который практически одновременно развивается в той же активной области. Ядерное взаимодействие ускоренных протонов (>500 МэВ) с ионами плазмы приводит в дальнейшем к возникновению высокоэнергичных гамма-квантов. Установлено, что взаимодействие вспышечного потока и скоростного коронального выброса в период импульсной фазы вспышки происходит в течение довольно ограниченных промежутков времени – от 2 до 16 минут. В рассмотренных событиях зарегистрирована прямая связь между максимальной величиной потока гамма - излучения $F_{\gamma>100\text{МэВ}}$ и скоростью корональных выбросов.

Для гамма-излучения в течение импульсной фазы вспышек характерны высокие максимальные значения потоков с 1 минутным разрешением $3.5 \cdot 10^{-4} \text{ } \gamma \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \leq F_{\gamma>100\text{МэВ}}^{\text{max}} \leq 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ } \gamma \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. При этом значение $F_{\gamma>100\text{МэВ}}^{\text{max}} = 0.013 \text{ } \gamma \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ оказывается самым высоким для событий, наблюдавшихся на LAT Fermi с 2008 по 2017 г.г.

Процесс развития корональных выбросов массы, являющийся основным энергетическим источником ускоренных частиц на главной фазе длительных вспышек, в некоторых случаях показывает исключения, а именно, демонстрирует преобладающее влияние в течение кратковременной импульсной фазы.

Работа поддерживается Программой целевого финансирования BR05336383 Аэрокосмического комитета МОАП Республики Казахстан.

ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОСТИ 24 СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

Старкова Л.И.

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

Проведена оценка момента окончания текущего 24 солнечного цикла. Оценка основана на установленной зависимости степени кривизны оси шлемов короны Солнца от фазы солнечного цикла. В качестве анализируемых данных была выбрана корона, которая наблюдалась во время полного солнечного затмения 21 августа 2017 года. Расчеты кривизны оси шлемов этой короны показали, что степень кривизны соответствует фазе солнечного цикла в интервале $-0.60 - -0.55$. С учетом уже наступившего момента максимума 24 цикла (2014.29 г.) приходим к заключению, что окончание 24 солнечного цикла следует ожидать в ноябре 2021 г. – сентябре 2022 г. В таком случае длительность 24 солнечного цикла оказывается в пределах 13 – 14 лет. Такая длительность 24 солнечного цикла существенно превышает наблюдаемые пределы вариации длительности солнечных циклов за последние 200 лет. Этот факт указывает на изменения условий генерации магнитного поля Солнца в нынешнюю эпоху.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ ПО ДАННЫМ AIA/SDO ЗА 24 СОЛНЕЧНЫЙ ЦИКЛ

Нечаева А.Б.¹, Зимовец И.В.¹, Накаряков В.М.², Goddard C.R.²

¹*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, nechaeva.ab@gmail.com*

²*University of Warwick, Coventry, UK*

В докладе представлен каталог изгибных колебаний солнечных корональных петель, который покрывает почти весь 24 солнечный цикл. Каталог основан на наблюдениях SDO/AIA в канале 171Å и включает в себя параметры 223 осцилляций в 96 событиях. Каталог предоставляет информацию о координатах осциллирующих петель, времени и дате событий, связанных с ними вспышками, начальном отклонении, периоде осцилляций, времени экспоненциального затухания и видимой амплитуде. Большинство детектированных осцилляций (84%) были связаны с петлями, расположенными рядом или вне солнечного лимба. Периоды осцилляций варьируются от 1 до 28 минут, 74% событий имеют период от 2 до 10 минут. Примерно 90% осцилляций имеют видимую амплитуду в диапазоне от 1 до 10 Мм. Длины осциллирующих петель от 70 до 600 Мм. Типичная наблюдаемая амплитуда составляет примерно 1% от длины петли. Найдена слабая корреляция как между периодом осцилляций и средним числом солнечных пятен, так и между длиной осциллирующих петель и средним числом солнечных пятен в фазе роста цикла. Коэффициенты корреляции 0.67 и 0.57 соответственно. В фазе спада корреляции между этими величинами не обнаружено. Период осцилляций растёт пропорционально длине петель, и время затухания растёт пропорционально периоду осцилляций, что подтверждает результаты предыдущих работ, основанных на анализе значительного меньшего количества событий. Добротность осцилляций пропорциональна амплитуде в степени -0.7. Каталог предоставляет научному сообществу базу для дальнейшего анализа изгибных колебаний и его использования для корональной сейсмологии.

Работа выполнена в рамках проекта “Сейсмология активных областей солнечной короны” программы Institutional Links Британского Совета.

РОЛЬ КВМ В РАЗВИТИИ LDE-ВСПЫШЕК НА СОЛНЦЕ

Шаховская А.Н., Григорьева И.Ю.

КрАО РАН, Республика Крым пгт. Научный, Россия,

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

На сентябрь 2011 года, пришелся первый максимум 24 цикла. Самая большая по площади и с самой высокой вспышечной активностью была группа 11302. Максимальный размер активной области составлял 1300 миллионных долей солнечного диска. Она проходила по диску с 22.09.2011 по 04.10.2011, за это время в ней произошли две рентгеновские вспышки балла X, 14 балла M, и 34 вспышки балла C. Из большого числа достаточно мощных вспышек, только две из них можно считать LDE. Одна из них произошла 22.09.2011 в 10:29 UT, когда АО была на восточном лимбе, а другая 24.09.2011 в 12:30 UT. Настоящая работа посвящена сравнению этих двух вспышек. Для анализа используются следующие данные: фильтрограммы в линии H α , полученные на телескопе КГ-1 КрАО, изображение диска Солнца со спутника SDO инструментами AIA и HMI, спутника STEREO-B измерение интегрального потока Солнца в мягком рентгене со спутника GOES-15, данные радионаблюдений RSNT и наблюдения коронографа LASCO- SOHO. В результате сравнения этих двух вспышек мы пришли к выводу, что обе они связаны с высокоэнергетическим КВМ, но на уровне хромосферы и нижней короны механизмы извержения существенно различались. В случае с 22 сентября имели место неоднократные извержения протуберанцев до КВМ, а 24 сентября до КВМ и после него были рекуррентные серджи и джеты. В обоих случаях мог иметь место каннибализм КВМ, когда один выброс догоняет другой и результате их взаимодействия получается КВМ с большей массой и более сложной структурой. Для таких КВМ количество оседающей вниз материи будет больше, что способствует развитию LDE -вспышек в низких петлях.

БЫСТРАЯ ПЕРЕСТРОЙКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ НЕЙТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Шарыкин И.Н., Зимовец И.В.

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

Произведен поиск событий с сильным и быстрым изменением магнитного поля вблизи нейтральной линии магнитного поля. Для этого использовались новые векторные магнитограммы HMI/SDO с временным разрешением 135 секунд. Отобрана солнечная вспышка M9.3 GOES класса, произошедшая 30 июля 2011 г. Событие примечательно тем, что вблизи НЛ были обнаружены изменения магнитного поля на временных масштабах 135 секунд, т.е. временного разрешения используемых магнитограмм. Наблюдалось быстрое усиление горизонтальной компоненты в области размера 3.5x7 Мм. Также зафиксировано быстрое усиление полного вертикального фотосферного электрического тока и рост горизонтального градиента вертикальной компоненты магнитного поля до величин более 1 кГс/Мм. При этом были зафиксированы сильные течения вблизи НЛ. Показано, что, скорее всего, наблюдавшаяся перестройка магнитного поля и системы электрических токов была связана с магнитным пересоединением между магнитными петлями вблизи НЛ. Предполагается, что магнитные петли имеют очень низкую высоту и, поэтому, мы наблюдаем сильные и быстрые изменения фотосферного магнитного поля вблизи НЛ.

КАТАЛОГ ГЕЛИОСЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК 24 ЦИКЛА

Шарыкин И.Н., Косовичев А.Г.

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

В работе приводятся результаты поиска солнечных вспышек М-Х класса за 24-й цикл солнечной активности, в которых наблюдались гелиосейсмические волны (солнцетрясения). Составлен наиболее полный каталог таких событий на сегодняшний день. Показано, что примерно для пятой части событий (~ 100) от полного числа М-Х вспышек наблюдались гелиосейсмические волны. Данный результат является крайне неожиданным, поскольку ранее предполагалось, что солнцетрясения крайне редки и наблюдается преимущественно в сильных вспышках. Однако анализ показал, что существует множество вспышек умеренной мощности, в которых наблюдались сильные солнцетрясения, тогда как в некоторых мощных Х вспышках волны либо совсем не наблюдались, либо были крайне слабы. Показано, что во вспышечной истории 24-го цикла существовали активные области, в которых генерация солнцетрясений во время вспышек была, в особенности, эффективной. Полученный каталог позволяет перейти на другой уровень исследования гелиосейсмической активности солнечных вспышек, перейти от исследования отдельных событий к статистическому анализу, что позволит лучше понять природу солнцетрясений в направлениях B_z^0 компоненты, в различных областях токовых слоев.

ВОЗМОЖНЫЙ КАНАЛ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОРОНЫ СОЛНЦА НА ХРОМОСФЕРУ

Мерзляков В.Л.

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

Изучалась эффективность нагрева хромосферы Солнца вышележащей горячей ($T_e \approx 10^6$ К) короны. Высказано предположение, что нагрев происходит, главным образом, за счет проникновения коронального вещества вследствие его дрейфового перемещения. Предложена модель перемещения как электрический дрейф в переменном магнитном поле, которое создают локальные магнитные источники солнечной фотосферы. Модельные расчеты показали, что поступающее в хромосферу корональное вещество эквивалентно потоку тепла мощностью $\sim 10^3$ эрг/см²с. Величина такого потока существенно меньше энергетических потерь солнечной хромосферы. Это означает, что хромосфера обладает собственным источником (источниками) нагрева.

SCALE-DEPENDENT POLARIZATION OF VELOCITY FLUCTUATIONS IN THE SOLAR WIND

Nemecek Z.(1), Safrankova J.(1), Nemec F.(1), Durovcova T.(1), Prech L.(1), Verscharen D. (2), Chen C.H.K.(3), Riazantseva M.O.(4)

(1) Charles University, Faculty of Mathematics and Physics, Prague, Czech Republic,

zdenek.nemecek@mff.cuni.cz

(2) Mullard Space Science Laboratory, University College London, U.K. and Space Science Center, University of New Hampshire, U.S.A.

(3) School of Physics and Astronomy, Queen Mary University of London, U.K.

(4) Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Turbulence is one of important sources of the solar wind heating along its path from the Sun. The turbulent cascade transports the energy from large scales where it is injected to smaller scales until the ion gyroscale is reached.

In this paper, we study the polarization properties of the velocity fluctuations in solar wind turbulence using hi

gh-resolution data from the Spektr-R spacecraft. The ratio of perpendicular to parallel velocity fluctuations in the MHD range is smaller than the equivalent ratio for magnetic fluctuations, but gradually increases throughout this range. In the kinetic range, there is a large decrease in the ratio, similar to the magnetic fluctuations. We compare the measurements to numerical solutions for a combination of kinetic Alfvén waves and slow waves, finding that both the slow increase and sharp decrease in the ratio are consistent with a majority population of Alfvén waves and minority population of slow waves in critical balance. Furthermore, the beta-dependence of this scale-dependent ratio can be successfully captured in the model when incorporating a beta-dependent Alfvén to slow wave ratio similar to that observed in the solar wind.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ В ГЕЛИОСФЕРЕ.

Мищенко А.В., Измоденов В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, e-mail: litergo@icloud.com

В локальной межзвездной среде (ЛМС), которая окружает солнечную систему, содержатся твердые частицы межзвездной пыли, которые проникают внутрь гелиосферы за счет ее движения относительно ЛМС. При этом частицы пыли имеют положительный заряд с поверхностным потенциалом $+0.5 \sim +1$ В в межзвездной среде и $+0.5 \sim +6$ В внутри гелиосферы, из-за чего они подвергаются воздействию электромагнитных сил. В настоящей работе исследуется движение частиц пыли под действием электромагнитных сил, а также сил гравитационного притяжения и радиационного давления Солнца.

Целью данного исследования является поиск особенностей в распределении межзвездной пыли, т.е. областей локального накопления частиц. Найденные области в полной постановке могут быть использованы при будущих экспериментальных исследованиях межзвездной пыли в гелиосфере. Математическая постановка задачи формулируется в размерном и безразмерном виде. Проводится анализ возникающих при этом безразмерных параметров. Для выявления особенностей, которые возникают из-за действия электромагнитных сил, представлена упрощенная постановка задачи без учета сил гравитационного притяжения и радиационного отталкивания, после чего рассматривается задача с учетом этих сил. Представляется численное решение поставленной задачи методом Осипцова-Лагранжа. Метод Осипцова-Лагранжа основан на решении уравнения неразрывности в лагранжевой форме вдоль траекторий частиц пыли. Вычисления проводились для разных безразмерных параметров, которые зависят от радиуса частиц пыли. Предложенный метод решения задачи может быть обобщен на случай произвольной астросферы.

РАССЕЯННОЕ СОЛНЕЧНОЕ ЛАЙМАН-АЛЬФА ИЗЛУЧЕНИЕ КАК ВОЗМОЖНЫЙ СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ОБРАТНОЙ СТОРОНЕ СОЛНЦА

Волосатых А.С., Измоденов В.В., Катушкина О.А.

МГУ им. М.В.Ломоносова, volosatych.as14@physics.msu.ru

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

В данной работе реализуется модель рассматриваемого явления, а также предлагается метод решения обратной задачи – определения параметров активной области по данным измерений Лайман-альфа излучения на космическом аппарате SOHO (прибор SWAN). Представлены результаты моделирования полных карт рассеянного Лайман-альфа излучения в присутствии активной области с различными параметрами модели. С использованием модели проведен анализ данных SOHO (SWAN) и получены оценки параметров активной области в рассматриваемые даты.

КОНИЧЕСКИЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ ВНУТРИ ПОЛЯРНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР - ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА И В ГЕЛИОСФЕРЕ

О.В. Хабарова¹, О.Е. Маландраки², Х.В. Малова^{3,4}, Р.А. Кислов^{1,4}, В.Н. Обридко¹, В.Д. Кузнецов¹, Л.М. Зелёный³

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

² Национальная обсерватория Афин, Пентели, Греция

³ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

⁴ ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Полярные области гелиосферы и Солнца – самые слабоизученные объекты космической физики в силу технических причин. Качественные дистанционные наблюдения Солнца выше 70° градусов требуют существенного подъема точки наблюдения над плоскостью эклиптики, что на данный момент не реализовано, а измерения параметров высокоширотного солнечного ветра осуществлялось лишь миссией *Ulysses*, закончившейся десять лет назад. В результате исторически сложилось так, что интерес к высокоширотным областям был минимальный. Между тем, работы последних лет показывают, что комплексный анализ данных наблюдений магнитных полей Солнца, наблюдений коронографов и *in situ* данных по солнечному ветру позволяет восстановить картину процессов, происходящих вблизи полюсов. Так были обнаружены высокоширотные токовые слои, локализующиеся внутри корональных дыр в минимуме солнечной активности (Khabarova et al., *ApJ*, 2017). Дальнейшее изучение этих объектов позволило установить, что это структуры размером на порядок меньше корональной дыры, которые закручены на манер торнадо, поддерживаются сильным магнитным полем и вращаются внутри корональной дыры быстрее, чем сама дыра. Схожие образования были недавно открыты на Юпитере миссией *Juno* (<https://www.nasa.gov/feature/jpl/nasa-juno-findings-jupiter-s-jet-streams-are-unearthly>). Формирование конусообразных магнитоплазменных структур вблизи оси вращения астрономических объектов с сильным магнитным полем – известный феномен в астрофизике, который, по-видимому, теперь следует отнести и к гелиофизике. Интересно, что конические токовые слои являются каналами энергичных частиц в гелиосферу, что решило проблему обнаружения *Ulysses* ионов с энергиями порядка keV-MeV на расстояниях 2-3 а.е. над полюсами Солнца. Выяснилось, что энергичные частицы ускоряются в процессе магнитного пересоединения на краях конических токовых слоев, которые на уровне фотосферы представляют собой кольцевые нейтральные линии внутри корональных дыр. Процесс пересоединения визуализируется полярными джетами. В докладе будет представлен комплексный обзор состояния знаний в области изучения этих интересных объектов.

Работа поддержана грантами РФФИ 17-02-00300, 17-02-01328, 18-52-06002, 19-02-00957.

Khabarova O.V., Malova H.V., Kislov R. A., L. M. Zelenyi, V. N. Obridko, A. F. Kharshiladze, et al., 2017, High-latitude conic current sheets in the solar wind, *The Astrophysical Journal*, 836, 108, 1, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/836/1/108>

СОЛНЕЧНЫЕ ЭРУПТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ И СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ 20-26 АВГУСТА 2018 г.

Абунин^{1,2} А.А., Абунина¹ М.А., Белов¹ А.В., Черток¹ И.М.

¹ ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия, abunin@izmiran.ru

² КалмГУ, г. Элиста, Россия,

На фазе глубокого минимума текущего довольно слабого 24-ого солнечного цикла 26 августа 2018 г. неожиданно произошла интенсивная геомагнитная буря (ГМБ) класса G3. Ее Dst индекс достиг -174 нТл, что соответствует третьей по интенсивности ГМБ в цикле. Прогнозисты фактически пропустили солнечный источник этой ГМБ. Однако, детальный анализ показал, что она была инициирована двумя эрупциями волокна и волоконного канала, локализованных в центральном секторе северной половины солнечного диска между северо-восточной и юго-западной корональными дырами. Эрупции наблюдались 20 августа с интервалом около 8 часов в линии H-альфа, а также с помощью ультрафиолетового телескопа SDO/AIA и сопровождалась двумя протяженными светящимися лентами, расходящимися со временем, и довольно крупными диммингами. При этом не зафиксировано ни заметного всплещного повышения потока мягкого рентгена, ни радиовсплесков. За обеими эрупциями последовали довольно слабые, но заметные корональные выбросы (CMEs), которые наблюдались как гало на коронографе SOHO/LASCO и как направленные к Земле транзиенты на коронографе STEREO-A/COR2, находившегося по углом 108° . Во внутренней короне скорость CMEs была довольно низкой порядка 200–300 км/с. По этой причине соответствующие межпланетные транзиенты (ICMEs) переносились фоновым солнечным ветром и достигли Земли только 25 августа.

Результирующий транзиент принес к земной магнитосфере неожиданно сильное поле $B_t \approx 20$ нТл с преимущественно южной B_z компонентой почти такой же напряженности. Геокосмическое возмущение проявило себя также в форме пекулярного Форбуш-понижения (ФП) потока галактических космических лучей (ГКЛ). Его амплитуда, соответствующая жесткости 10 ГВ и определенная на основе данных мировой сети нейтронных мониторов (НМ) по методу глобальной съемки, была $\sim 1.4\%$, что довольно мало для зафиксированной ГМБ класса G3. На некоторых североевропейских НМ на фоне ФП наблюдался заметный положительный всплеск потока ГКЛ. В частности, на НМ ИЗМИРАН (Москва) этот всплеск состоял из двух похожих импульсов с амплитудой 3% и 2.5%, длительностью 4–6 часов и примерно таким же интервалом между ними. Представлены свидетельства того, что эти импульсы были обусловлены анизотропией ГКЛ в пришедшем к Земле ICME со сложной внутренней структурой и понижением жесткости геомагнитного обрезания в возмущенной земной магнитосфере.

Работа выполнена с использованием оборудования УНУ «Сеть СКЛ». Работа частично поддержана в рамках грантов РФФИ №17-02-00308 и РНФ №15-12-20001. Мы также признательны всем сотрудицам сети станций КЛ

<http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>.

**МЕЖЗВЕЗДНЫЙ НЕЙТРАЛЬНЫЙ КИСЛОРОД В ГЕЛИОСФЕРЕ: АНАЛИЗ
ДАННЫХ КА IBEX НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Балюкин И.И., Измоденов В.В., Алексашов Д.Б., Катушкина О.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, balyukin.ii@gmail.com

Межзвездные нейтральные атомы кислорода проникают в гелиосферу из локальной межзвездной среды. Атомы кислорода, которые напрямую проникают в гелиосферу, принято называть первичными. Наряду с первичной существует также вторичная компонента межзвездных нейтральных атомов кислорода, которая образуется в окрестности гелиопаузы из-за перезарядки межзвездных ионов кислорода с атомами водорода и ее существование в гелиосфере было ранее предсказано теоретически (Izmodenov et al, 1997, 1999, 2004). В данной работе мы изучаем распределение как первичной, так и вторичной компонент атомов кислорода в гелиосфере, а также их потоки на орбите Земли.

Количественный анализ распределения межзвездного кислорода в гелиосфере возможен только с помощью модели, которая учитывает как фильтрацию первичного и рождение вторичного межзвездного кислорода в области взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой, так и детальное моделирование движения межзвездных атомов внутри гелиосферы, учитывающее временную и гелиоширотную зависимости процессов ионизации и перезарядки на протонах солнечного ветра, а также силу солнечного гравитационного притяжения. В настоящей работе представлены результаты моделирования межзвездных атомов кислорода внутри гелиосферы на основе новой трехмерной модели взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой (Izmodenov and Alexashov, ApJS, 2015). Атомы кислорода особенно интересны потому, что они, в силу процесса перезарядки, сильно связаны с протонами, а также из-за того, что потоки межзвездного нейтрального кислорода напрямую измеряются на космическом аппарате (КА) Interstellar Boundary Explorer (IBEX). Первые количественные данные измерений потоков межзвездных атомов кислорода на КА IBEX были представлены в 2015 г. (Park et al., ApJS, 2015). Качественный анализ этих данных показывает, что наряду с первичными межзвездными атомами кислорода была также измерена вторичная компонента межзвездных атомов. Проводится сравнение результатов расчетов с данными, полученными на КА IBEX.

ГЛОБАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ФАЗЕ СПАДА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ

И. В. Чашей, С. А. Тюльбашев, И. А. Субаев, Извекова В.А.

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Пушчинская Радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича

Представлены результаты анализа данных трехлетней серии мониторинга межпланетных мерцаний в 2015-2017 гг. на фазе спада солнечной активности. Наблюдения выполнены на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Показано, что в течение рассматриваемого периода пространственное распределение уровня мерцаний в среднем было близко к сферически симметричному и не испытывало сильных временных вариаций на месячных и годовых интервалах. Среднемесячные значения уровня мерцаний не коррелируют с числами Вольфа.

ВОЗМУЩЕННЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ СТРУКТУРЫ В ОКРЕСТНОСТИ СОЛНЦА И ОТКЛИК НА НИХ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ.

Ефимов А.И., Луканина Л.А., Смирнов В.М., Чашей И.В., Бёрд М.К., Петцольд М.
ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, efimov@ms.ire.rssi.ru

Анализ данных радиозондирования околосолнечной плазмы сигналами космических аппаратов (КА) MARS EXPRESS в 2010/2011 гг. показал, что на протяжении периода измерений отмечались повышенные флуктуации частоты радиоволн сантиметрового и дециметрового диапазонов. Это объясняется прохождением через трассу радиосвязи КА с Землей возмущенных плазменных потоков, генерируемых Солнцем. Так, 26 декабря 2010 г. на восточном лимбе было зарегистрировано резкое увеличение значений измеряемых параметров. Усиление флуктуаций было также зафиксировано на западном лимбе 9 марта 2011 г. По данным КА AKATSUKI [1] выявлено повышение значений измеряемых характеристик 13 июня 2011 г. на западе от Солнца.

По данным спутников Земли WIND и ACE было установлено, что в период минимума солнечной активности среднемесячные значения параметров околоземной плазмы изменяются в пределах $\pm 20\%$ от среднегодовых величин. Специфичным результатом наблюдений в окрестности Земли является обнаружение резких, в десятки раз, возрастаний концентрации протонов и магнитного поля. Длительность такого рода событий составляет 3-5 часов. В 2011 г. были отмечены 3 таких события: 6 января, 1 марта и 5 июня 2011г. продолжительностью 2.49, 2.07 и 17.31 часа соответственно.

Следует отметить, что случаи, когда сильно возрастают значения характеристик околоземной космической плазмы, удалены друг относительно друга на промежутки времени, пропорциональные периоду ($T_0=27$ суток) или полупериоду вращения Солнца вокруг своей оси.

События, произошедшие вблизи Солнца, были сопоставлены с резким возрастанием параметров космической плазмы в околоземном пространстве. Промежуток времени с 26 декабря 2010 г. по 6 января 2011 г. составил 11 дней. Возмущенная область Солнца была на востоке, и потоки плазмы достигли трассы радиосвязи за 1.5 дня. Еще через 6 суток эта область оказалась напротив Земли, и потоки возмущенной плазмы устремились в ее направлении и достигли орбиты спустя 3.5 дня. Заметим, что промежуток времени между событиями у Земли (сильное увеличение концентрации протонов) 5 июня и резкое возрастание интегральной электронной концентрации на трассе радиозондирования солнечного ветра сигналами КА AKATSUKI 13 июня составляет 8 суток, что близко к аналогичной величине для другой комбинации подобных событий, зарегистрированных у Земли 1 марта и на трассе радиозондирования солнечного ветра сигналами спутника MARS EXPRESS 9 марта.

Детальный анализ материалов измерений у Земли 5 июня и на орбите КА AKATSUKI показывает, что в обоих случаях наблюдаются квазипериодические осцилляции 5-минутного диапазона.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0030-2019-0008, при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 28 «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

1. Ando H., Shiota D., Imamura T., Tokumaru M., Asai A., Isobe H., Pätzold M., Häusler B., and M. Nakamura B. // Journal of Geophysical Research 2015. V. **120**. P. 5318.

ПОВЫШЕННОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЕЛИЯ В МАГНИТНЫХ ОБЛАКАХ

Ермолаев Ю.И.(1), Лодкина И.Г.(1), Ермолаев М.Ю.(1), Рязанцева М.О.(1), Рахманова Л.С.(1), Бородкова Н.Л.(1), Григоренко Е.Е.(1), Веселовский И.С.(1,2), Шугай Ю.С.(2), Слемзин В.А.(3), Родькин Д.Г.(3)

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

2. НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, 3. ФИАН, г. Москва, Россия

Ряд исследований показали, что тяжелые ионы могут играть важную роль в формировании токовых структур в различных космических плазмах. На основе данных OMNI для 1976-2016 годов мы анализируем временной ход ряда плазменных параметров и межпланетного магнитного поля в различных крупномасштабных типах солнечного ветра: CIR, Sheath, MC (magnetic cloud) и Ejecta и 8 обычных их последовательностях включая межпланетную ударную волну. В настоящей работе основной акцент сделан на исследования относительного содержания гелия (альфа-частиц) Na/Np . В областях сжатия CIR и Sheath величина Na/Np изменяется почти монотонно между значениями на границах этих областей, т.е. возрастает, так как содержание гелия Na/Np в быстром СВ и быстрых MC и Ejecta выше, чем в предшествующем СВ. В отличие от областей сжатия, магнитные облака и Ejecta имеют максимальное содержание гелия и минимальный β -параметр (максимальная величина IMF, B) в их центре, причем эта особенность более заметна в MC по сравнению с Ejecta (Ермолаев и др., 2018a). Эти результаты могут быть объяснены предположением, что электрический ток в центре MC и Ejecta содержит повышенное содержание гелия (Yermolaev et al., 2018b, c) и подтверждают полученные ранее данные для других типов космических плазм. Небольшое изменение величины и более низкие значения Na/Np по интервалу явления и более слабая зависимость Na/Np от β -параметра в Ejecta по сравнению с MC могут быть связаны не только с различиями в процессах их формирования на Солнце, но и с условиями их наблюдения вблизи Земли (траектория космического корабля относительно оси ICME) (Ермолаев и др., 2017).

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант 19-02-00177a.

1. Yermolaev, Y.I., Lodkina, I.G., Nikolaeva, N.S., Yermolaev, M.Y.: 2017, Dynamics of Large-Scale Solar-Wind Streams Obtained by the Double Superposed Epoch Analysis: 2. Comparisons of CIRs vs. Sheaths and MCs vs. Ejecta. Solar Phys. 292:193. DOI: 10.1007/s11207-017-1205-1

2. Yermolaev Yu. I., I. G. Lodkina, M. Yu. Yermolaev, M. O. Riazantseva, L.S. Rakhmanova, N. L. Borodkova, Yu. S. Shugay, V. A. Slemzin, I. S. Veselovsky, D. G. Rodkin: 2018a, Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis. 4. Helium abundance, <http://arxiv.org/abs/1807.03579>

3. Yermolaev, Yuri I., Irina G. Lodkina, Michael Yu. Yermolaev, Natalia L. Borodkova, Maria O. Riazantseva: 2018b, Temporal profiles of parameters in different large-scale types of solar wind, 15th Solar Wind Conference, 18 - 22 June, Brussels, Belgium, DOI: 10.13140/RG.2.2.33710.00327

4. Yermolaev, Yu. I., I. G. Lodkina, M. Yu. Yermolaev, E. E. Grigorenko, N. L. Borodkova, M. O. Riazantseva, L. S. Rakhmanova: 2018c, Helium abundance profiles in the large-scale solar-wind phenomena, AGU Fall Meeting, Washington, 10-14 Dec DOI: 10.13140/RG.2.2.14610.91842

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖЗВЕЗДНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА В ГЕЛИОСФЕРЕ.
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО.**

Годенко Е.А., Измоленов В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, eg24@yandex.ru

Гелиосфера движется через Местное межзвездное облако (Local Interstellar Cloud), которое содержит атомы водорода. Вследствие относительного движения происходит проникновение межзвездных атомов водорода в гелиосферу. Движение атомов происходит под действием центрально-симметричного силового поля (гравитационное притяжение к Солнцу, радиационное отталкивание). Целью данного исследования является построение трехмерной модели распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере.

В силу того, что длина свободного пробега межзвездных атомов водорода по столкновениям больше характерного размера поставленной задачи (например, характерного размера гелиосферы), то движение нельзя описывать гидродинамическими методами. Необходимо использовать кинетический подход, который состоит в решении кинетического уравнения на поиск функции распределения. Предполагается, что невозмущенный поток (во внешности гелиосферы) атомов водорода находится в равновесии, а, значит, имеет максвелловское распределение, которое мы будем использовать в качестве граничного условия при решении кинетического уравнения. Так как длина свободного пробега межзвездных атомов водорода по перезарядке на протонах солнечного ветра сравнима с характерным размером гелиосферы, то необходимо учитывать процесс перезарядки при моделировании. Решение кинетического уравнения проводится методом Монте-Карло с расщеплением траекторий. С помощью расщепления траекторий можно на несколько порядков уменьшить относительную статистическую ошибку в окрестности Солнца (куда попадает сравнительно мало тестовых частиц) при неизменных вычислительных мощностях. Движение частицы под действием центрально-симметричного силового поля допускает точное аналитическое решение, которое и используется при реализации метода Монте-Карло. Данная задача является частью решения глобальной задачи о взаимодействии солнечного ветра с частично-ионизованной плазмой межзвездной среды.

НАГРЕВ, УСКОРЕНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ ИОННОГО СОСТАВА КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАССЫ И ТРАНЗИЕНТА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

**Горяев Ф.Ф.¹, Гречнев В.В.², Родькин Д.Г.¹, Слемзин В.А.¹, Кочанов А.А.², Уралов А.М.²,
Киселев В.И.²**

¹ *ФИАН РАН, г. Москва, Россия, goryaev_farid@mail.ru*

² *ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Наиболее сильные возмущения космической погоды вызываются транзитными потоками солнечного ветра (СВ) – межпланетными корональными выбросами массы (МКВМ), порождаемыми образующимися на Солнце корональными выбросами массы (КВМ). Вблизи орбиты Земли МКВМ идентифицируются по параметрам плазмы СВ и характеристикам магнитного поля. В докладе рассмотрено формирование быстрого КВМ, вызванного эрупцией протуберанца на восточном лимбе Солнца 24 февраля 2011 г., сопровождавшейся вспышкой класса М3,5. Порождённый этим событием МКВМ через два дня был зарегистрирован детекторами на STEREO-B.

Кинематика выброса и состояние плазмы выброса вблизи Солнца и на орбите Земли анализировались по данным инструментов космических обсерваторий SDO и STEREO-B. Параметры плазмы в формирующемся КВМ определялись методами спектроскопической диагностики по данным многоканального телескопа крайнего ультрафиолетового излучения SDO/AIA. Выявлен нагрев протуберанца на стадии инициации, соответствующий росту потока мягкого рентгеновского излучения, и его резкий разогрев ускоренными электронами во время вспышки при эрупции и трансформации в магнитный жгут. Установлены ожидаемая ориентация жгута КВМ и направление закрутки магнитного поля в нём. Анализ измеренных на STEREO-B составляющих магнитного поля транзита показал их соответствие оценкам по области источника и модельным представлениям о магнитной структуре МКВМ вблизи орбиты Земли.

Ионный состав плазмы стационарного СВ становится практически неизменным («замораживается») начиная с расстояний в несколько солнечных радиусов от поверхности Солнца из-за падения плотности вследствие расширения в гелиосферу. При прохождении КВМ через корону параметры его плазмы также эволюционируют с последующим «замораживанием» ионного состава, но процессы формирования и расширения КВМ резко нестационарны. Для моделирования ионного состава плазмы КВМ использовались кинетические уравнения баланса, учитывающие процессы ионизации и рекомбинации и адиабатическое охлаждение плазмы из-за падения её плотности в расширяющемся жгуте. В результате расчета установлено, что в данном событии снижение среднего заряда ионов железа $\langle Q_{\text{Fe}} \rangle$ не превышало 3% начиная с двух солнечных радиусов от поверхности Солнца. Результаты модельного расчета для ионов Fe согласуются с измерениями на STEREO-B как для среднего заряда $\langle Q_{\text{Fe}} \rangle$, так и для распределения ионов Fe по стадиям ионизации.

На примере анализируемого события показано, что ряд параметров МКВМ вблизи орбиты Земли определяется породившей его эрупцией и может быть оценён по данным солнечных наблюдений.

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ И КИНЕТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Веселовский И.С., Капорцева К.Б.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, kb.kaportceva@physics.msu.ru

Проведен анализ МГД классификации потоков солнечного ветра [1] и её сравнение с некоторыми другими существующими классификационными схемами. Особое внимание уделено идентификации высокоскоростных потоков и корональных выбросов массы по данным за 2010-2011 года. Обсуждается значимость редких типов, таких как быстрые холодные потоки: fcdm, fcdn, ferm, fern, и медленные горячие потоки: shdm, shdn, shrm, shrn (здесь f-fast, s-slow, h-hot, c-cold, d-dense, r-rarefied, m-magnetized, n-nonmagnetized).

В число преимуществ МГД классификации входит наглядность, простота и возможность использования в цифровых алгоритмах, успешная идентификация таких проявлений солнечной активности, как высокоскоростные потоки из корональных дыр и корональные выбросы массы, возможность рассмотрения взаимодействующих потоков [2], а также отражение глобальных тенденций солнечной активности в максимуме и минимуме солнечных циклов (рассмотрены 23 и 24 солнечных циклы).

Авторы выражают благодарность Лукашенко А.Т. за её участие в создании МГД классификации потоков солнечного ветра.

1. Веселовский И.С., Лукашенко А.Т., Капорцева К.Б. // Ядерная физика 2018. Т. **81**. С. 663-667. DOI: 10.1134/S0044002718050185

2. Родькин Д.Г., Капорцева К.Б., Лукашенко А.Т., Веселовский И.С., Слемзин В.А., Шугай Ю.С. // Космические исследования 2019. Т. **57**. С. 1-11. *(в печати)*

**РАССЕЯННОЕ ЛАЙМАН-АЛЬФА ИЗЛУЧЕНИЕ КАК СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ
ГЕЛИОШИРОТНЫХ ВАРИАЦИЙ ПОТОКА МАССЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА**

Катушкина О.А., Измоденов В.В.

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

В этой работе изучаются временные и широтные вариации потока массы солнечного ветра на 1 а.е., полученные на основе данных SOHO/SWAN о рассеянном солнечном Лайман- α излучении в 1996-2018 гг. Ранее в работе Katushkina [1] было показано, что широтные профили потока массы солнечного ветра во время солнечного максимума 2001-2003 гг. имеют два отдельных пика на средних гелиоширотах. В нашей работе приводятся данные для последнего солнечного максимума в 2014–2016 гг. Показано, что такое специфическое распределение с двумя пиками по широте наблюдается снова, однако, в 2014–2016 годах эти два пика располагаются ближе друг к другу и иногда сливаются в один пик. Проводится сравнение наблюдений SWAN с результатами модели WSA-Enlil, которая представляет собой трехмерную нестационарную модель распространения солнечного ветра от солнечной короны до гелиосферы. Показано, что модель WSA-Enlil качественно подтверждает широтное распределение солнечного ветра, найденное по данным SWAN, хотя существуют некоторые количественные различия. Обсуждаются физические причины формирования такой широтной структуры в максимуме солнечной активности.

1. Katushkina O.A., Izmodenov V.V., Quemerais E., Sokol J.M. // Journal of Geophysical Research 2013. V. **118**. P. 2800.

МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СКОРОСТИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С РАЗЛИЧНЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ МАСШТАБАМИ ПРИ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИИ НА РАЗНЕСЁННЫХ АНТЕННАХ

Коломиец С. Ф., Луканина Л. А., Копнина Т. Ф.

Фрязинский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия,

annfrank@fpl.gpi.ru

Разнесённый приём сигналов радиопросвечивания солнечного ветра позволяет количественно оценивать скорость среды. Однако, по таким данным определялось в основном групповое время запаздывания (ГВЗ) при известном расстоянии между лучами [1]. Временные ряды флуктуаций скорости потока, определяемого по ГВЗ, позволяют качественно оценить турбулентный режим течений [1, 2]. Массовый экспериментальный материал, полученный с использованием подобного подхода, указывает на то, что однородным и изотропным режим турбулентности солнечного ветра можно считать лишь на расстояниях более 15-20 солнечных радиусов [3]. Однако для изучения причин отклонения турбулентного режима от ожидаемого колмогоровского на близких расстояниях к Солнцу возможностей методов, основанных на ГВЗ недостаточно. Требуется их усовершенствование для более тонкого анализа структуры потока.

Геометрия радиопросвечивания солнечного ветра определяет функциональную связь между частотой флуктуаций и пространственным масштабом неоднородностей. Таким образом, простейший анализ динамической структуры потока может заключаться в расчёте ГВЗ после частотной фильтрации. Описание согласованного подхода к интерпретации подобных оценок в литературе найти не удалось. С целью формирования и апробации оригинального способа интерпретации таких данных был проведён цикл численных экспериментов, которые позволили экспериментально установить правила формирования экспериментальных оценок. Теоретическое их обоснование было предложено с использованием зависимостей, впервые опубликованных в [4], и далее развивавшихся как в работах по измерению скорости движения ионосферных, так и тропосферных рассеивающих неоднородностей [5, 6]. Соответствующие зависимости никогда не рассматривались применительно к сигналам после частотной фильтрации.

Применение предлагаемой методики оценки скорости движения среды к реальным экспериментальным данным, полученным вблизи Солнца позволяет уверенно обнаруживать двухскоростной режим потока в то время, как обычными способами он не обнаруживается [7]. Соответственно, в односкоростном представлении источником однородной изотропной турбулентности такой поток быть не может. Анализ его рассеивающих свойств и тонкой структуры их флуктуаций в различных участках спектра совместно с данными оптических инструментов позволяет предполагать, что подобный режим может формироваться при пересечении стримера лучами радиозондирования. Таким образом, динамические процессы в последнем могут изучаться отдельно от «фонового» солнечного ветра.

1. Efimov A.I., et al. // Solar Physics, 2015. V. **290**. P. 2397
2. Chashei I.V., et al. // Astron. & Astrophys. Transactions, 2007. V. **26**. P. 611
3. Yakovlev O. I. and Pisanko Y. V. // Adv. Space Res., 2017. V. **61**, P. 552
4. Briggs, B. H. et al. // Proc. of the Physical Soc. Section B, 1950. V. **63**. P. 106.
5. Costa E. et al. // Radio Sci., 1988. V. **23**, P. 141.
6. Doviak R. J. et al. // Radio Sci., V. **31**, P. 157.
7. Chashei I.V., et al. // Adv. Space Res., 2005. V. **35**. P. 2195

**ОБ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ РОЛИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ИНТЕНСИВНОСТИ ГКЛ В ГЕЛИОСФЕРЕ В ПЕРИОДЫ НИЗКОЙ
ПЯТНООБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА**

Крайнев М.Б., Калинин М.С.,
ФИАН г. Москва, Россия

В докладе приводятся аргументы против широко распространённой точки зрения, что в происходящей в гелиосфере модуляции ГКЛ основными процессами являются конвекция, диффузия, адиабатическое охлаждение, обусловленные циклом пятнообразования на Солнце, а магнитный дрейф из-за влияния общего магнитного поля Солнца вносит небольшой вклад в модуляцию ГКЛ. Обсуждаются противоречивые в этом отношении результаты наблюдений и расчётов интенсивности ГКЛ в гелиосфере.

Для разрешения указанного предположения рассматривается роль разных процессов в формировании градиента расчётной интенсивности ГКЛ. Предлагается гипотеза, что относительная роль дрейфа и диффузии обусловлена тем, что, в отличие от диффузии, которая даёт вклад в интенсивность, пропорциональный градиенту интенсивности, но при этом уменьшает этот градиент, магнитный дрейф активно формирует градиент интенсивности. В данном докладе основное внимание уделяется ситуации при самых высоких рассматриваемых энергиях (90-100 ГэВ).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭМИССИЙ В АТМОСФЕРЕ МАРСА

**Куликов С.В.¹, Скальский А.А.¹, Соколова Е.², Сантолик О.³, Колмашова И.³,
Корепанов В.⁴.**

¹ ИКИРАН, г. Москва, Россия, kulikov@rx24.ru

² ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

³ ИФА, г. Прага, Чехия

⁴ ЛЦ ИКИ, г. Львов, Украина

Марс, в связи с отсутствием глобального магнитного поля и наличием локальных очагов сильной намагниченности [1], является очень интересным объектом для исследования. Марсианская магнитосфера совмещает в себе электромагнитные явления присущие планетам, обладающим собственным магнитным моментом и свойственные индуцированным магнитосферам. Электризация частиц пыли в пылевых бурях может вызывать электростатические разряды в планетарной атмосфере. Результаты моделирования свидетельствуют о возможности достижения электрического пробоя в неплотной марсианской атмосфере при определенных плотностях частиц, составе частиц и достаточно высокой скорости ветра [2]. Однако, до сих пор не были проведены измерения магнитного поля на поверхности Марса.

Прибор MAIGRET, разрабатываемый в рамках проекта EXOMARS 2020, позволит произвести первый мониторинг электромагнитной активности с посадочной платформы на поверхности Марса. В настоящей работе представлены данные полученные аппаратом Phobos-2 вблизи мест предполагаемой посадки, свидетельствующие о наличии плазменных волн с частотами ниже электронно-циклотронной частоты. Показано, что данные эмиссии возникают при пролете спутника над областями слабых магнитных аномалий. Помимо этого мы приводим обзор известных волновых явлений, происходящих в магнитосфере и ионосфере Марса, а также оценки электромагнитных полей, генерируемых пылевыми бурями и торнадо в Марсианской атмосфере.

1. Connerney J. E. P., Acuña M. H., Ness N. F., Spohn T., Schubert G.// Space Science Reviews 2004. V. **111**.P. 1-32.

2. Melnik O., Parrot M.// Journal of Geophysical Research 1998. V. **103**. P. 29107-29118.

MULTI-WAVELENGTH ANALYSIS OF SEP-RELATED SOLAR FLARES DURING SOLAR CYCLES 23 AND 24

Miteva R. [1], Veronig A. [2], Samwel S.W. [3], Koleva K. [4], Dechev M. [4], Dickson E. [2], Dissauer K. [2], Kashapova L. [5], Temmer M. [2]

[1] *Space Research and Technology Institute–Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria, rmiteva@space.bas.bg*

[2] *Institute of Physics-IGAM, University of Graz, Graz, Austria*

[3] *National Research Institute of Astronomy and Geophysics, Helwan, Cairo, Egypt*

[4] *Institute of Astronomy with National Astronomical Observatory – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

[5] *Institute of Solar-Terrestrial Physics – SB Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

We present GOES soft-X-ray, RHESSI hard X-ray, RSTN radio and SDO/EVE ultraviolet analysis of solar flares identified as the origin of in situ observed energetic particles during solar cycles 23 and 24, where data is provided. Particle intensities from solar energetic protons (SOHO/ERNE) and electrons (ACE/EPAM DE) are used for the analysis. The focus of this study are the flare parameters – using traditional and new wavelength ranges – that are utilized in the correlation analysis with the particles. The findings are compared with the results when using coronal mass ejections and discussed in view of new forecasting possibilities. First results are summarized in [1].

This work is supported by the following grants: Bilateral project Bulgaria–Russia with the National Science Fund of Bulgaria contract No. DNST/Russia 01/6 (23-Jun-2017) and Russian Foundation for Basic Research Project No. 17-52-18050; Bilateral project Bulgaria–Austria with the National Science Fund of Bulgaria contract No. NTS/AUSTRIA 01/23 (28.02.2017) and Austria OeAD Project No. BG 11/2017, and SCOSTEP-VarSITI grant in 2018 under the ISEST/Minimax24 project.

1. Miteva R., Koleva K., Dechev M. et al. // Publ. Astron. Soc. 'Rudjer Boskovic' 2018, V. 18, P. 117.

DYNAMIC FEATURES OF ERUPTIVE PROMINENCES RELATED TO SOLAR ENERGETIC PARTICLES

Tsvetkov, Ts.¹, Miteva, R.², Petrov, N.¹, Myshyakov, I.³

¹Institute of Astronomy and National Astronomical Observatory BAS, Sofia, Bulgaria,
nip.sob@gmail.com

²Space Research and Technology Institute BAS, Sofia, Bulgaria

³Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Solar flares and coronal mass ejections (CMEs) might become a hazard for both humans in space and spacecraft since they are able to accelerate particles to high energies that can reach Earth if propagating along interplanetary magnetic fields. We quantify the role of another eruptive event, eruptive prominences, as a precursors of solar energetic particle (SEP) fluxes. The association rate between protons and filaments and/or filament eruptions is investigated using the largest reported event sample covering the SDO era of prominence observations. We choose a well observed set of events to compare dynamic properties of filaments with SEP spectral indices. Relationships between proton spectral index γ and properties of the other associated solar phenomena (flare peak flux, CME speed, EPs speeds) are also investigated.

This work is supported by the National Science Fund of Bulgaria with contract No. KP-06-H28/4, DNST/Russia 01/6 (23-Jun-2017), and the Russian Foundation for Basic Research Project No. 17-52-18050.

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

В.П. Охлопков

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

Поскольку проблема влияния планет на солнечную активность вызывала большой интерес у исследователей, то автор ввел оригинальный параметр – среднюю разность гелиоцентрических долгот планет (СРД). Там, где разность минимальна, в этих ситуациях планеты находятся на одной линии с Солнцем, в линейной конфигурации. Были рассчитаны линейные конфигурации трех планет – Венеры, Земли и Юпитера и составлен индекс этих конфигураций, который был использован для сопоставления с солнечной активностью. Наилучшая связь солнечной активности (использованы числа Вольфа) получена только для трех планет – Венеры, Земли и Юпитера [1 - 3].

Индекс линейных конфигураций составлен по минимальным значениям СРД (планеты находятся в соединении, одна конфигурация), а также по минимальным отклонениям планет от линии, проходящей через них и Солнце при расположении планет по разные стороны от Солнца (3 конфигурации). Обозначим его для краткости как JEV, по первым буквам латинских названий планет [1]. Этот индекс, объединяющий все 4 конфигурации, имеет 11-летнюю периодичность и описывает 11-летний цикл солнечной активности.

Рассчитана приливная волна на Солнце от планет Венеры, Земли и Юпитера, которая хорошо согласована с индексом JEV.

Планетный индекс JEV рассчитан с 1000 года по настоящее время, и проведено его сопоставление с солнечной активностью. Для периода с 1000 по 1699 гг использован ряд солнечной активности Шове, а с 1700 года использованы числа Вольфа. Хотя данные по солнечной активности до 1700 года получены косвенным путем, наблюдается полное соответствие числа циклов как в индексе JEV, так и в солнечной активности. Основная по амплитуде периодичность в них совпадает и равна 11.07 лет.

Совпадение средней длительности 11-летней периодичности за 1000-летний интервал с точностью до второго знака после запятой указывает на связь индекса JEV с 11-летним солнечным циклом. По результатам данной работы следует, что планеты Венера, Земля и Юпитер синхронизируют 11-летний цикл солнечной активности.

1. Охлопков В.П. // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2012. № 4. С. 56 (Okhlopov V.P. // Moscow University Physics Bulletin, 2012, V. 67, No. 4, P. 377).
2. Охлопков В. П. // Известия РАН. Сер. Физ., 2013, Т. 77, № 5, С. 667. (Okhlopov V.P. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2013, V. 77, No. 5, P. 599).
3. Охлопков В.П. // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2014. № 3. С. 50 (Okhlopov V.P. // Moscow University Physics Bulletin, 2014, V. 69, No. 3, P. 257).
4. Охлопков В.П. // Вестник Московского университета, Серия 3. Физика. Астрономия. 2016. № 4, С. 92. (Okhlopov V.P. // Moscow University Physics Bulletin, 2016, V. 71, No. 4, P. 440.)

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА СВОЙСТВА ТУРБУЛЕНТНОГО КАСКАДА В МАГНИТОСЛОЕ

Рахманова Л.С.¹, Рязанцева М.О.¹, Застенкер Г.Н.¹, Я. Шафранкова², З. Немечек², Л. Прех²

¹*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, rakhnud@gmail.com*

²*Карлов Университет, г. Прага, Чешская Республика*

Турбулентность космической плазмы широко изучалась на основе спутниковых измерений в солнечном ветре и магнитослое. На основе статистического анализа было показано, что характеристики турбулентного каскада на ионных масштабах в этих двух областях могут различаться (напр., Huang et al., 2017; Rakhmanova et al., 2018). Статистический анализ дает возможность определить характерные параметры турбулентности отдельно в указанных двух областях околоземного пространства, но не позволяет оценить, каким образом параметры набегающего потока солнечного ветра влияют на свойства турбулентного каскада в магнитослое. Анализ отдельных измерений характеристик турбулентности в солнечном ветре и магнитослое на масштабах порядка гирорадиуса протона проводился ранее только для флуктуаций магнитного поля. В данной работе впервые на основе анализа ряда случаев единовременных измерений параметров плазмы перед и за околоземной ударной волной исследуется влияние характеристик турбулентности в солнечном ветре на свойства турбулентного каскада в магнитослое. В работе используются измерения потока ионов с временным разрешением 31 мс, получаемые прибором БМСВ на спутнике Спектр-Р. Указанное временное разрешение позволяет исследовать частотные спектры флуктуаций параметров плазмы в диапазоне частот 0.01-10 Гц, соответствующем переходу от инерционной области турбулентного каскада к диссипативной. В настоящей работе для анализа выбирались пересечения спутником Спектр-Р околоземной ударной волны в период 2011-2018 гг., наблюдающиеся при спокойных условиях в солнечном ветре, т.е. при квазистационарном временном ходе параметров плазмы и при отсутствии транзиентных явлений. В работе проводится сравнение формы и характеристик частотных спектров флуктуаций потока ионов перед и за фронтом околоземной ударной волны, а также рассматривается модификация функции распределения флуктуаций потока ионов.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-02-00177.

1. Huang, S. Y., Hadid, L. Z., Sahraoui, F., Yuan, Z. G., & Deng, X. H. // ApJ Letters 2017, 836(1), L10.

2. Rakhmanova, L., Riazantseva, M., Zastenker, G., & Verigin, M. // JGR 2018, 123(7), 5300–5314.

МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ПОТОКА ИОНОВ В БЫСТРЫХ ПОТОКАХ ПЛАЗМЫ, АССОЦИИРОВАННЫХ С РАЗЛИЧНЫМИ КРУПНОМАСШТАБНЫМИ СТРУКТУРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА.

Рязанцева М.О.¹, Рахманова Л.С.¹, Будаев В.П.^{1,2}, Ермолаев Ю.И.¹, Лодкина И.Г.¹, Застенкер Г.Н.¹, Чесалин Л.С.¹, Шафранкова Я.³, Немечек З.³, Прех Л.³

¹ФГБУН Институт Космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), г. Москва, Россия, orearm@gmail.com

² Российский Научный центр «Курчатовский Институт» (РНЦ КИ), г. Москва, Россия.

³ Charles University in Prague, Czech Republic.

Свойства мелкомасштабных плазменных флуктуаций в солнечном ветре могут существенным образом зависеть от крупномасштабных характеристик потока, в котором они наблюдаются. Традиционно считается, что ключевым фактором является скорость потока солнечного ветра. Так в быстрых потоках наблюдается более высокий уровень флуктуаций, при этом спектры флуктуаций на высоких частотах спадают быстрее, чем в медленных потоках солнечного ветра [1]. Как правило, при анализе производится селекция на медленные и быстрые потоки солнечного ветра, без учета их происхождения. В данной работе проведено сравнение статистических и спектральных характеристик мелкомасштабных флуктуаций потока ионов по измерениям на КА Спектр-Р в медленных и быстрых потоках солнечного ветра различной природы. Отдельно рассматриваются быстрые потоки из корональных дыр и быстрые потоки, ассоциированные с транзиентными явлениями такими, как межпланетные проявления корональных выбросов массы (ЕЈЕСТА) и магнитными облаками (МС). Селекция потоков, наблюдающихся в крупномасштабных структурах различного типа, проводится с помощью нашего каталога (см. сайт <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/> и статью [2]). Использование данных прибора БМСВ с высоким временным разрешением, позволяет провести анализ плазменных флуктуаций в широком диапазоне масштабов, в том числе на малых масштабах, где значительный вклад могут вносить кинетические эффекты. В работе показано, что характер мелкомасштабных флуктуаций может существенно отличаться в быстрых потоках, имеющих одинаковую среднюю скорость потока, но ассоциированных с различными крупномасштабными структурами солнечного ветра.

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

1. Bruno R., Trenchi L., Telloni D. // Astrophys J. Lett. 2014. V. **793**. № 1. L15. P. 5.
2. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. // Космич. Исслед. 2009. Т. **47**. №2. С. 99-113.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ФРОНТОВ МЕЖПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

Сапунова О. В., Бородкова Н. Л., Застенкер Г. Н.

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

Исследовалась тонкая структура фронтов Межпланетных Ударных Волн (МУВ), зарегистрированных плазменным спектрометром БМСВ, установленным на спутнике СПЕКТР-Р. Спектрометр позволяет непрерывно получать параметры плазмы солнечного ветра с высоким временным разрешением – 0.031 с для потока и направления и 1.5 с - для скорости, температуры и концентрации. Это дает возможность изучать внутреннюю структуру фронта МУВ - рампы, подножие, овершут, а также колебания (как по параметрам плазмы, так и по значениям магнитного поля) как перед, так и за фронтом. Значения магнитного поля были взяты со спутников WIND, THEMIS-B/-C, CLUSTER C1-4.

Показано, что толщина фронта МУВ лежит в пределах от 40 км до 600 км. Средняя скорость движения ударных волн составила 460 км/с. Особое внимание было уделено наблюдавшимся до фронта колебаниям (примерно в половине случаев). Их длина составила от 70 до 400 км.

Составлен список событий, в которых присутствовали колебания вблизи фронта. Вычислены их частоты (от 0.8 до 7 Гц) и длины волн (от 58 до 450 км) согласно параметрам плазмы и магнитного поля.

Были построены годографы поведения векторов магнитного поля и потока в период колебаний в проекции на фронт МУВ или на плоскость, перпендикулярную среднему значению параметра.

Работа была выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 16-02-00669 А и № 16-02-00125 А.

ФОРМИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ПЛОЩАДЬ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР В 24-м ЦИКЛЕ АКТИВНОСТИ

Тлатов А.Г.^{1,2}, Илларионов Е.А.³, Березин И.А.¹

¹*Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, tlatov@mail.ru*

²*КалмГУ, Элиста*

³*МГУ, г. Москва, Россия, egor.mypost@gmail.com*

Выполнен анализ скорости солнечного ветра (СВ) на расстояние 1 а.е. и свойств корональных дыр (КД) в 24-м цикле активности. Между площадью КД и скоростью СВ существует неоднозначная связь. В период 2010-2015 гг. между этими параметрами существовала положительная корреляционная связь ($R \sim 0.5$), но в период 2016-2018 гг. корреляция практически отсутствует. Это проявляется в том, что несмотря на большое число и площадь низкоширотных КД, высокоскоростные потоки солнечного ветра в этот период представлены относительно слабо. Площадь КД мы определяли по данным спутниковых наблюдений телескопа SDO/AIA193, а также по данным расчетов областей с открытой магнитной конфигурацией по наблюдениям телескопа-магнитографа СТОП.

Мы выделили два периода в средней интенсивности магнитного поля в КД B_{av}^{CH} . В эпоху сильной солнечной активности 2011-2015, магнитное поле имело интенсивность $B_{av}^{CH} \sim 2-3$ Г. С 2016 г. интенсивность магнитных полей значительно снизилось и в период минимума составляло $B_{av}^{CH} \sim 1$ Г. На основании этого анализа мы можем сделать вывод, что скорость СВ зависит не только от геометрических свойств областей с открытой конфигурацией магнитных силовых линий и фактора расширения магнитного поля f_s , но также и от величины средней напряженности магнитного поля в КД.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 18-02-00098 и РНФ проект 15-12-20001.

ВЛИЯНИЕ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ НА ДИНАМИКУ ПОТОКОВ СКЛ В ФЕВРАЛЕ 2014 г.

Власова Н.А., Тулупов В.И.

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва,
Россия, nav19iv@gmail.com*

Представлены результаты исследования некоторых особенностей профилей возрастных потоков солнечных энергичных протонов 20 февраля и 25 февраля – 5 марта 2014 г. Солнечные протонные события ассоциируются с солнечными вспышками: 20 февраля балла M3/SN с координатами S15W67 и 25 февраля балла X4/2B с координатами S12E82. Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных по потокам солнечных протонов, полученных с КА ACE и ИСЗ GOES, и измерений параметров межпланетной среды: скорости и плотности солнечного ветра и величины и направления межпланетного магнитного поля, выполненных на КА ACE. Интерпретация экспериментальных данных проведена с использованием предположения, высказанного Г.П.Любимовым в 1973 г., что фундаментальной структурой в гелиосфере является плазменно-магнитная трубка, а также эмпирической «отражательной» модели движения, накопления и модуляции космических лучей [1, 2]. Среди основных физических принципов «отражательной» модели есть предположения, что распространение солнечных космических лучей в межпланетной среде происходит в квазистационарных структурах межпланетного магнитного поля и в процессе распространения солнечные частицы могут частично захватываться новыми структурами межпланетного магнитного поля [3].

Показано, что временные профили потоков солнечных энергичных протонов частично модулированы в соответствии с вариациями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Результаты сравнительного анализа временных вариаций потоков солнечных протонов с $E > 10$ МэВ и $E > 30$ МэВ и B_z - и B_y -компонент межпланетного магнитного поля 20 февраля 2014 г. свидетельствуют об определяющей роли структуры межпланетного магнитного поля на формирование особенностей профилей потоков частиц.

27 февраля 2014 г. к Земле пришел фронт высокого давления (до 10 нПа) солнечного ветра и сильного межпланетного магнитного поля (до 20 нТл), который мог быть причиной наличия 28 февраля второго максимума на профилях возрастания потоков солнечных протонов с $E > 10$ МэВ и $E > 30$ МэВ.

Доклад посвящается 95-летию Германа Павловича Любимова. Г.П.Любимов - один из пионеров космических экспериментов, возглавлявший творческий коллектив лаборатории физики гелиосферы НИИЯФ МГУ, силами которого проведены исследования на автоматических межпланетных станциях серий Зонд, Марс, Венера, Луна, Луноход, Вега, Фобос и ИСЗ ГРАНАТ (в 1961-1996 гг. - 44 эксперимента).

1. Любимов Г.П. Отражательная модель движения СКЛ в петлевых ловушках // *Астрономический циркуляр АН СССР*. 1988. № 1531. С. 1916.
2. Любимов Г.П., Григоренко Е.Е. Об отражательной модели солнечных космических лучей // *Космические исследования* 2007. Т. 45. № 1. С. 12.
3. Тулупов В.И., Григоренко Е.Е., Власова Н.А., Любимов Г.П. Движение и перенос солнечных космических лучей в гелиосферных ловушках на примере события 28-31.I.2001 // *Космические исследования*. 2012. Т.50. №6. С. 427-434

THE PROTON EVENT CATALOGS AT SRTI-BAS

Miteva R., Danov D.

Space Research and Technology Institute - Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,
mitkodanov@abv.bg

Solar energetic particle (SEP) phenomena is an important element of space weather. The growing interest, together with the large number of SEP events, require their systematization. There are several such attempts.

Two SEP event catalogs are compiled in the Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences (SRTI-BAS). They are based on solar energetic proton measurements made on board of two satellites (Wind/EPACT and SOHO/ERNE) in solar cycles 23 and 24.

The purpose of this report is to show the current state of development of the proton event catalogs at SRTI-BAS. For each event in these catalogs an associated flare and CME pair is proposed by us. In addition, we developed a comprehensive search and print options integrated into the catalogs. The search option offers an interactive way for pre-selection of events according to the customer needs. The printing capability facilitates the offline data analysis.

This work is supported by the National Science Fund of Bulgaria with contract No. DNST/Russia 01/6 (23-Jun-2017).

ПРОТОННЫЕ ВОЗРАСТАНИЯ И МАГНИТНЫЙ ПОТОК ДИММИНГОВ И ПОСТЭРУПТИВНЫХ АРКАД СОЛНЕЧНЫХ ЭРУПЦИЙ

Абунин^{1,2} А.А., Абунина¹ М.А., Белов¹ А.В., Гайдаш¹ С.П., Прямушкина¹ И.И., Трефилова¹ Л.А., Черток¹ И.М.

¹ ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия, abunin@izmiran.ru

² КалмГУ, г. Элиста, Россия,

В последние годы было показано, что магнитный поток солнечных эрупций, рассчитанный по наблюдениям диммингов и постэруптивных аркад, тесно связан с величиной Форбуш-понижений и силой геомагнитных бурь, являющихся следствием этих эрупций. Поскольку в мощных спорадических событиях наблюдается комплекс взаимосвязанных явлений, включающий вместе с выбросами солнечного вещества эффективное ускорение, естественно ожидать связь магнитного потока эрупций и с величиной протонных возрастаний. В представляемой работе проверяется это предположение. Полный магнитный поток эрупций, а также его составные части, связанные с диммингами и аркадами сопоставляются с протонными событиями для энергий протонов >10 и >100 МэВ, наблюдавшимися на спутниках GOES, и наземными возрастаниями солнечных космических лучей.

Работа выполнена с использованием оборудования УНУ «Сеть СКЛ». Работа частично поддержана в рамках грантов РФФИ №17-02-00308 и РНФ №15-12-20001. Мы также признательны всем сотрудникам сети станций КЛ

<http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>.

КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАССЫ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

**Абунин^{1,2} А.А., Абунина¹ М.А., Белов¹ А.В., Гайдаш¹ С.П., Прямушкина¹ И.И.,
Трефилова¹ Л.А.**

¹ ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия, abunin@izmiran.ru

² КалмГУ, г. Элиста, Россия,

Эффективность межпланетных возмущений с различной структурой активно исследуется, поскольку эта тема фундаментально интересна и важна для практики. Чаще всего изучается связь структуры межпланетных возмущений с геомагнитной активностью. Однако немало работ и про влияние структуры ICMEs на модуляцию космических лучей, точнее на свойства Форбуш-понижений. Цель данной работы – выявить особенности и характерные черты межпланетных возмущений с разной структурой, основываясь на положении максимума ММП и понять как структура наблюдаемых возмущений связана с их эффективностью (способностью создавать Форбуш-понижения в космических лучах и возрастания геомагнитной активности).

Работа выполнена с использованием оборудования УНУ «Сеть СКЛ». Работа частично поддержана в рамках грантов РФФИ №17-02-00308 и РНФ №15-12-20001. Мы также признательны всем сотрудникам сети станций КЛ
<http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>.

ВЛИЯНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ РАДИОВСПЛЕСКОВ

Афанасьев А.Н., Афанасьев Н.Т.

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

Как известно [1], при интерпретации данных наземных и орбитальных наблюдений структуры радиоизлучения солнечных источников, расположенных во внутренних областях короны, необходимо учитывать эффекты воздействия околосолнечной плазмы. Наиболее существенно это воздействие при распространении радиовсплесков метрового и декаметрового диапазона. Для расчета структуры наблюдаемых всплесков с учетом регулярной рефракции и рассеяния радиоволн в околосолнечной плазме эффективно использовать приближение геометрической оптики и ее квазилучевые обобщения [2]. В работе [3] в лучевом приближении проведено исследование распространения радиоизлучения декаметровых всплесков в солнечной короне, источники которых находятся на обратной стороне Солнца по отношению к наблюдателю на Земле. На основе закона Снеллиуса и кусочно-линейной аппроксимации траектории луча сделана оценка влияния корональных выбросов массы (КВМ) на распространение радиоизлучения из залимбовой области. В результате показана возможность наземных наблюдений залимбовых всплесков за счет влияния КВМ из активных областей вблизи солнечного лимба, порождающих полости с пониженной электронной концентрацией.

В настоящей работе исследована возможность диагностики параметров КВМ по вариациям декаметровых радиовсплесков на разных частотах, прошедших через корону. Для различных моделей электронной концентрации короны и КВМ проведены строгие численные расчеты лучевых уравнений, записанных в гамильтоновой форме. Изучены изменения траекторий лучей в сложных условиях в зависимости от параметров КВМ и начальных координат солнечных радиоисточников, в том числе и залимбовых. Определены гелиофизические условия существенного воздействия КВМ на зондирующий луч. С помощью траекторных расчетов выявлены условия уверенного наблюдения декаметровых радиовсплесков от внутренних корональных источников, расположенных в залимбовой области Солнца, в присутствии КВМ. В приближении метода возмущений получено решение траекторной задачи радиопросвечивания возмущенной короны с учетом значительных искривлений траектории. Получены функциональные соотношения, связывающие траекторные характеристики сигналов просвечивания из залимбовой области с параметрами трехмерной структуры КВМ. Показана возможность определения параметров полости с пониженной электронной концентрацией КВМ по данным измерений траекторных характеристик сигналов на разных частотах.

1. Плазменная гелиогеофизика. Т.1/ Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 672 С.
2. Afanasiev A.N. // Solar Phys. 2006. V. 238. P. 87-104.
3. Станиславский А.А. // Радиофизика и радиоастрономия. 2016, Т. 21, № 1. С. 3-13.

**ВЛИЯНИЕ ОТРАЖЕННЫХ ИОНОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ФРОНТА
МЕЖПЛАНЕТНОЙ КВАЗИПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С МАЛЫМИ
ЧИСЛАМИ МАХА И ПАРАМЕТРОМ БЕТА**

**Бородкова Н.Л.¹, Еселевич В.Г.², Сапунова О.В.¹, Застенкер Г.Н.¹, Ермолаев Ю.И.¹,
Шафранкова Я.³, Немечек З.³, Прех Л.³**

¹ Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия, nlbor@mail.ru

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

³ Карлов Университет, факультет математики и физики, г. Прага, Чешская Республика

По данным плазменного спектрометра БМСВ, установленного на КА СПЕКТР-Р, измеряющего параметры плазмы солнечного ветра с временным разрешением ≈ 0.031 сек., исследовалась структура нескольких фронтов квазиперпендикулярных межпланетных ударных волн с малыми числами Маха и параметром бета. Особое внимание было уделено колебаниям потока ионов и магнитного поля, возникающим вблизи рампа. Было показано существование последовательностей цугов колебаний, как магнитного поля, так и потока ионов перед рампом, амплитуда которых спадала до нуля при удалении от рампа. Получено, что длина волны колебаний потока ионов и магнитного поля, в отдельных случаях, уменьшалась в цуге колебаний, ближайшем к рампу. Средняя частота осцилляции волн перед рампом сопоставима с ионной инерционной длиной.

Были исследованы зависимости толщины рампа и длины колебаний вблизи рампа от параметров невозмущенного солнечного ветра и параметров ударного фронта. Получено, что толщина рампа ударной волны уменьшается с ростом угла $\theta_{Вп}$.

**ОБ ОЖИДАЕМЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕЛИОФЕРЫ И ГКЛ В
ПРИБЛИЖАЮЩЕМСЯ МИНИМУМЕ МЕЖДУ СОЛНЕЧНЫМИ ЦИКЛАМИ 24 И 25**

Крайнев М.Б., Базилевская Г.А., Калинин М.С., Свиржевский Н.С.

ФИАН, г. Москва, Россия

Ранее мы оценили возможные характеристики гелиосферы, важные для распространения ГКЛ (радиальная компонента межпланетного магнитного поля B_r , наклон гелиосферного токового слоя к экватору α_t и скорость солнечного ветра V_{sw}), и определяемую ими интенсивность ГКЛ $J(E)$ в середине 2019 г. [Геомагнетизм и Аэрономия, **58**, №2, 177, 2018]. Эта оценка была сделана, исходя из линейного тренда в указанных гелиосферных характеристиках, наблюдаемого в трёх предыдущих минимумах пятнообразовательной активности Солнца. Момент $t_m=2019.5$ тогда оценивался как приблизительное время достижения максимальной интенсивности ГКЛ.

Прошедшие после этих оценок два года продемонстрировали, что наблюдаемое поведение обсуждаемых гелиосферных характеристик и интенсивности ГКЛ существенно отличаются от их поведения в предыдущих солнечных циклах. На основании этих данных и сравнения развития 24-го солнечного цикла с предыдущими (с 1874 г., когда существуют данные по площади и координатам солнечных пятен) мы пытаемся дать новые оценки $\{t_m, B_r, \alpha_t, V_{sw}, J(E)\}$.

КАТАЛОГ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЯВЛЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА. АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В 21-24 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Лодкина И.Г., Ермолаев Ю.И.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, irina-priem@mai.ru

В ИКИ РАН на протяжении более 10 лет создается каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра (СВ) (см. сайт <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/>), в котором содержатся данные за период 1976 – 2017 годы, подготовленные на базе данных OMNI2. В каталоге идентифицированы 3 типа квазистационарных потоков СВ: гелиосферный токовый слой (HCS), высокоскоростные потоки (HSS) из корональных дыр и медленные потоки из корональных стримеров, и 5 возмущенных типов СВ: области сжатия перед быстрыми потоками HSS (CIR), межпланетные проявления выброса корональной массы (ICME), которые могут включать в себя магнитные облака (MC) и Ejecta с областями сжатия Sheath ($SH E_{MC}$ и $SH E_{EJ}$, соответственно), предшествующие им, а также межпланетная ударная волна (IS). С целью изучения вариаций параметров на масштабах солнечных циклов нами был проведен анализ поведения параметров СВ: В – величина магнитного поля, Т – температура плазмы, N – концентрация СВ, V – скорость СВ, β – отношение теплового давления к магнитному давлению, Dst индекс, для различных типов СВ (CIR, Sheath, Ejecta и MC) по 3-м вариантам: усреднение параметров на каждом цикле, усреднение по годам в цикле, и двойным методом наложения эпох. Полученные результаты подтверждают, что (1) количество возмущенных типов СВ и (2) средние значения анализируемых параметров СВ в 24-м цикле меньше, чем в предыдущих циклах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 16-12-10062.

Ю.И. Ермолаев, Н.С. Николаева, И.Г. Лодкина, М.Ю. Ермолаев (2009), Каталог крупномасштабных солнечных ветровых явлений в 1976-2000 гг., Космические исследования, т. 47, № 2, стр. 81-94

3D ANALYSIS OF SEP-RELATED CMES

Tsvetkov, Ts.¹, Miteva, R.², Temmer, M.³, Petrov, N.¹

¹Institute of Astronomy and National Astronomical Observatory BAS, Sofia, Bulgaria,
tstsvetkov@astro.bas.bg

²Space Research and Technology Institute BAS, Sofia, Bulgaria

³Institute of Physics, University of Graz, Austria

Coronal mass ejections (CMEs) are important drivers of space weather activity. Their shocks can accelerate solar energetic particles (SEPs). Earth directed CMEs (that propagate towards Earth's location) produce the majority of geomagnetic storms. CME appearance in coronagraphs depends on projection effects and Thomson scattering amplitudes. By using coronagraphs on various spacecraft, one gets measurements of the projected speed from various viewpoints. To measure the kinematic properties of CMEs and determine their qualitative features we performed an analysis using Stereo CAT tool on selected SEP-related CMEs in solar cycle 24. That procedure combines STEREO A & B and SOHO viewpoints to reveal three-dimensional distribution of CME parameters. The results are compared with the interpretations when using CME projected parameters.

RELATIONSHIP BETWEEN SOLAR ERUPTIVE PROMINENCES KINEMATIC PROPERTIES AND MAGNETIC DECAY INDEX

Myshyakov, I.¹, Tsvetkov, Ts.², Petrov, N.²

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ivan_m@mail.iszf.irk.ru

²Institute of Astronomy and National Astronomical Observatory BAS, Sofia, Bulgaria

The decay index is a magnetic parameter that indicates whether the external magnetic field had a configuration that may lead to a certain type of flux rope instability. Since it is a useful instrument for predicting the behaviour of eruptive filaments, we perform potential extrapolation to obtain spatial distribution of the magnetic decay index in the corona above eruptive prominences. The results are compared to the height-time profiles of the eruptions to reveal that the velocity increases on a critical height with certain values of the decay index.

This work is supported by the National Science Fund of Bulgaria with contracts No. KP-06-H28/4, DNST/Russia 01/6 (23-Jun-2017), and the Russian Foundation for Basic Research Project No. 17-52-18050.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА НАГРЕВНОМ СТЕНДЕ АРЕСИБО В НОЯБРЕ 2018 Г

Грач С.М., Шиндин А.В., Сергеев Е.Н.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, sgrach@rf.unn.ru

В начале 2018 г. авторами был выигран проект “Investigation of HF-induced plasma turbulence at low latitude by SEE technique, ISR, HF-sounding, GPS and optical instruments” на проведение экспериментальных исследований искусственной ионосферной турбулентности на нагревном низкоширотном стенде Аресибо (Пуэрто-Рико, США) с использованием измерений искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) и диагностического оборудования стенда, включая радар некогерентного рассеяния.

Проект включал в себя 4 конкретные программы по исследованию: ленгмюровской турбулентности; перехода к генерации верхнегибридной турбулентности; «длинного нагрева» для исследования ИРИ и процессов генерации искусственного оптического свечения в ночной ионосфере; изучение процессов возбуждения и релаксации искусственных периодических неоднородностей на высотах D- и E-слоев в низкоширотной дневной ионосфере. Программы были реализованы в период 7-9 ноября 2018 г. с 14:30 до 18:30 LT в обсерватории Аресибо при непосредственном участии Шиндина А.В. и интерактивном участии (из России) Грача С.М. и Сергеева Е.Н. Частота воздействия составляла $f_0 = 5095$ кГц, эффективная мощность излучения ~ 100 МВт. Сотрудники обсерватории Аресибо обеспечивали работу стенда по разработанным нами частотно-временным режимам излучения, апробированным на стендах СУРА и НААРП.

Получены следующие предварительные результаты:

1. Исследования ленгмюровской плазменной турбулентности в условиях «холодного старта» показали наличие слабого эффекта стрикционного самовоздействия волны накачки (~ 5 дБ) в дневной ионосфере, возрастающего до 10 дБ в вечерних условиях. Ширина спектра узкополосной компоненты ИРИ не превышала 25 кГц. Величина эффекта на стендах СУРА и НААРП составляла ~ 25 и ~ 35 дБ, соответственно.
2. С переходом к квазинепрерывному нагреву плазмы обнаруживается развитие «верхнегибридных» компонент ИРИ downshifted maximum (DM), 2DM и broad continuum. Стационарные спектры ИРИ аналогичны спектрам, имеющим место на стендах СУРА и НААРП при аналогичном соотношении f_0 и f_c (гирочастоты электронов): $f_0 < 6f_c$ (в районе стенда Аресибо $f_c \sim 0,9$ кГц). Времена развития ИРИ составляют ~ 10 сек, что значительно медленнее чем на стендах СУРА и НААРП. Величина аномального ослабления пробных волн составляла $\sim 15-20$ дБ в условиях длительного нагрева.
3. Использование диагностического зондирования процессов развития и релаксации искусственной низкочастотной турбулентности показало короткие времена релаксации ($\sim 1-3$ с) диагностического ИРИ после выключения нагрева, что отвечает дневным условиям измерений.
4. Проведено предварительное сопоставление данных измерений ИРИ с данными радара некогерентного рассеяния.

Данные анализа исследований искусственных периодических неоднородностей D- и E-области представлены на настоящей конференции в докладе [1].

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

1. Бахметьева Н.В. и др., Особенности и результаты диагностики нижней ионосферы земли методом создания искусственных периодических неоднородностей в высоких, средних и низких широтах

**ИССЛЕДОВАНИЕ УЗКОПОЛОСНОГО ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА НАГРЕВНОМ
СТЕНДЕ EISCAT/HEATING**

Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Йоман Т.К.

ААНИИ Росгидромет, г. Санкт Петербург, Россия, askalishin@aaari.ru

В экспериментах ААНИИ, выполненных на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating в г. Тромсе, северная Норвегия (69.6°N, 19.2°E), впервые было обнаружено и зарегистрировано на расстоянии порядка 1200 км от нагревного комплекса узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ). УИРИ регистрировалось в полосе ± 1 кГц относительно частоты нагрева при воздействии на высокоширотную F -область ионосферы мощной КВ радиоволны необыкновенной поляризации (Х-мода). Результаты этих экспериментов показали возможность возбуждения различных спектральных компонент в спектре УИРИ, таких как ионно-акустические, электростатические ионно-циклотронные и ионные Бернштейновские волны.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик, условий и возможных механизмов генерации узкополосного искусственного радиоизлучения в высокоширотной F -области ионосферы при воздействии мощных КВ радиоволн Х- поляризации. Эксперименты выполнялись в диапазоне частот нагрева от 5.4 до 8 МГц при различных эффективных мощностях излучения и углах наклона диаграммы направленности антенны КВ нагревного комплекса (78, 84 и 90°). Регистрация УИРИ осуществлялась в двух пунктах наблюдений: обсерватория ААНИИ НИС «Горьковская» под г. С.-Петербурга и пос. Ловозеро Мурманской области.

Было установлено, что наиболее интенсивные спектральные компоненты в спектре УИРИ наблюдаются при излучении мощной КВ радиоволны Х-поляризации в направлении магнитного зенита (78°). Времена развития электростатических ионных циклотронных волн и их гармоник составляли 15 – 18 с при «холодном» старте (в первом цикле Х-нагрева) и существенно уменьшались в последующие циклы Х-нагрева, когда они начинались регистрироваться уже в первые секунды нагрева.

По данным экспериментов при изменении эффективной мощности излучения от 5.3 до 550 МВт было установлено, что пороговые мощности возбуждения электростатических ионных циклотронных волн составляли порядка 130 – 160 МВт. Рассмотрены возможные механизмы генерации спектральных компонент в спектре УИРИ при Х-нагреве F -области ионосферы. Механизм генерации ионных гирогармонических структур может быть связан с развитием параметрической неустойчивости, при которой мощная электромагнитная волна Х-поляризации в области отражения трансформируется в высокочастотную электронную Бернштейновскую (ЕВ) и низкочастотную ионную Бернштейновскую (ИБ) плазменные волны.

ДИНАМИКА РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ ОБЛАКА ПЛАЗМЫ В ИОНОСФЕРЕ

Глазырин С.И., Шидловский Д.С.

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова,
г. Москва, Россия, glazyrin@itep.ru*

В докладе с помощью магнитогидродинамической (МГД) модели будет рассмотрена динамика расширяющегося облака плазмы в ионосфере Земли. Будет исследовано влияние начальных возмущений в облаке на его разлёт. Этот эффект будет сопоставлен с влиянием неоднородности ионосферы и магнитного поля Земли. Также будут обсуждаться границы применимости МГД приближения.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ИОНОСФЕРНЫХ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ВЫШЕ И НИЖЕ ПИКА СЛОЯ F ПО ДАННЫМ ИОНОЗОНДА И СПУТНИКА SWARM

Акчурин А.Д., Смирнов Г.С.

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

В ионосфере Земли постоянно присутствуют неоднородности различных масштабов, для регистрации которых применяются различные методы от дистанционных ракетных/спутниковых по месту (*in situ*). Однако ни один метод не может показать всю картину неоднородности с полным пространственным распределением концентрации всех основных компонентов плазмы и их температуры (а часто еще необходимо знать распределение электрических полей). Все это не позволяет определить физическую причину образования неоднородностей, и как следствие предсказать место и время их появления, а также их размеры и продолжительность существования. В частности, в средних широтах спорные вопросы о механизмах существования относятся к среднемасштабным перемещающимся ионосферным возмущениям (СМ ПИВ), постоянно присутствующим в магнитно-спокойные времена. Традиция отнесения всех ионосферных возмущений перемещающихся на протяженные расстояния без значительного изменения формы к волновому действию нейтральной атмосферы привела к устойчивому безоговорочному мнению о СМ ПИВ как о результате простого безреактивного (без ответной реакции) перераспределения ионосферной плазмы под действием внутренней гравитационной волны (ВГВ). С ростом экспериментальных свидетельств СМ ПИВ на различной приборной базе стало возникать не мало вопросов к такому возникшему в 60-х подходу к СМ ПИВ, как простому слепку ВГВ, рождающихся в нижней атмосфере и постоянно «бомбардирующих» среднюю и верхнюю ионосферу. В частности СМ ПИВ имеют устойчивую тенденцию распространяться в направлении экватора во всех полушариях с непонятным отличием в направлении зональной составляющей: к востоку днем и к западу ночью. Для любых источников ВГВ (если первоначально исключить те, что находятся в авроральной зоне) такое распространение их слепок в лице СМ ПИВ вызывает недоумение.

Одним из подходов определения высотной структуры среднеширотных СМ ПИВ выше пика слоя F является привлечение к наземным ионозондовым измерениям около Казани одновременных спутниковых измерений. Наиболее подходящими для наших целей оказались данные об электронной концентрации, полученные со спутниковой эскадры Swarm. Для точной пространственной привязки к спутниковым данным использовался строгий отбор данных дневных пролетов спутников: их траектория не должна удаляться от долготы Казани более 100 км по широте, а пространственная протяженность неоднородности в измерениях плазмосферной электронной плотности должна быть не менее 100 км без более мелких (высокочастотных) неоднородностей. Из всех пролетов спутников за ~2 года (2016-18) удалось выбрать 7 таких случаев. Для найденных случаев были построены взаимные корреляционные функции последовательностей значений двух рядов критической частоты и электронной концентрации. Корреляционная функция имеет яркий отрицательный пик, разбросом в пределах 100 км, что с учетом типичной горизонтальной длины волны СМ ПИВ (~200 км) означает противофазное поведение электронных концентраций внутри СМ ПИВ ниже и выше пика слоя F дневной среднеширотной ионосферы.

Авторы признательны ESA за предоставленные спутниковые данные.

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

1. Francis S.H. // J. Geophys. Res. 1974. V. **79**. P. 5245.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ПРИ РАЗЛЕТЕ ПЛОТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБЛАКОВ В ЗАМАГНИЧЕННУЮ ФОНОВУЮ ПЛАЗМУ НА ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ «КРОТ»: ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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

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

Задача о расширении плотного плазменного облака в замагниченную фоновую плазму возникает в самых разных областях космической физики, включая разработку моделей солнечных вспышек и астрофизических джетов, прогноз эффектов от космических взрывов, эксперименты по инъекции плазменных струй и бариевых облаков с борта космических аппаратов. С учетом многокомпонентного состава плазмы и ее существенно неоднородной динамики, для верификации разрабатываемых моделей перспективным подходом представляется лабораторное моделирование. Ограниченное моделирование космических эффектов возможно на специализированных – достаточно больших – плазменных установках с использованием критериев подобия.

В докладе представлены результаты первых экспериментов по разлету плазменных облаков, создаваемых коаксиальными пушками, на стенде «Крот». За счет рекордного размера плазменного столба – более одного метра поперек магнитного поля, на этой установке удастся реализовать режим «безграничной» фоновой плазмы, создаваемой сторонним источником (индукционным ВЧ разрядом), который оптимален для моделирования астрофизических и геофизических явлений. Созданные коллективом эрозионные генераторы плазмы на полиэтилене позволяют формировать струи углеродно-водородной плазмы, полностью вытесняющие магнитное поле индукцией до 200 Гс на масштабе порядка 10 см.

Исследования выполнены при инъекции плазмы вдоль и поперек направления внешнего магнитного поля, в фоновую плазму, нейтральный газ и в вакуум. В субальфвеновском режиме разлета облака наблюдается комплекс эффектов, характерных для лабораторных и космических экспериментов, включая образование диамагнитной каверны, торможение ионов облака фоновой плазмой и развитие высокочастотных неустойчивостей на границе облака на высокоэнергетической стадии его расширения. Фотосъемка, производимая камерами с быстрым затвором, позволяет исследовать структурные неустойчивости облаков на стадии распада. Полученные результаты обсуждаются в сопоставлении с геофизическими явлениями, наблюдаемыми при постановке активных экспериментов различных типов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПФ РАН (проект № 0035-2018-0021) при поддержке РФФИ (проект № 18-29-21018 мк).

**ПЕРСПЕКТИВЫ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ ПРИ
ТРАНСИОНОСФЕРНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Коробков¹ С.В., Гущин¹ М.Е., Терехин² В.А., Терехин² А.В., Солдатов² А.В.,
Стриковский¹ А.В., Айдакина¹ Н.А., Зудин¹ И.Ю.**

¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, korobkov@ipfran.ru

²РФЯЦ ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Стенд «Крот» [1] был создан в начале 80-х годов прошлого века как специализированная установка для изучения процессов взаимодействия мощных микроволновых пучков с плазмой. Основу плазменного стенда составляет вакуумная камера объемом 180 м³. Существующий на данный момент высокочастотный индукционный генератор и источник импульсно магнитного поля позволяют создавать плазменный столб рекордного диаметра равного 3 метрам с высокой степенью пространственной однородности. Максимальная длина участка трассы плотной плазмы для распространения радиоволн достигает 10 метров. Это позволяет моделировать волновые процессы в плазменных оболочках Земли и отдельные явления, касающиеся динамики космической плазмы.

В связи с появлением мощных генераторов сверхширокополосных электромагнитных импульсов (длительностью до 1 нс) интерес представляет исследование эффектов при их распространении через ионосферу и магнитосферу Земли. Этот процесс может сопровождаться трансформацией формы импульса, ускорением заряженных частиц и дополнительной ионизацией. Одним из надежных способов решения таких задач и проверки теоретических представлений является лабораторное моделирование. Из-за своих размеров «Крот» является единственной в мире установкой, позволяющей проводить такие лабораторные исследования в режиме «безграничной» плазмы.

В докладе представлены результаты экспериментов по распространению СШП ЭМИ с длительностью фронта около 70 пс и частотным спектром в полосе до нескольких ГГц в плазме. Полученные в квазиоднородном плазменном столбе данные согласуются с результатами численного моделирования. Описан планируемый эксперимент по распространению СШП ЭМИ в гигантской коаксиальной линии с плазменным заполнением. Полученные результаты используются для интерпретации эффектов распространения СШП ЭМИ в ионосфере. Обсуждается возможность создания плазменной дисперсионной линии с перестраиваемыми параметрами для испытаний элементов техники при воздействии СШП ЭМИ, прошедших через плазму.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0035-2018-0021.

1. URL: unu.ipfran.ru

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПРАЙТОВ И ДЖЕТОВ НА БОЛЬШОЙ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКЕ

Евтушенко А.А., Стриковский А.В., Коробков С.В., Гуцин М.Е.
ИПФ РАН, г. Н.Новгород, Россия, a_evtushenko@inbox.ru

Открытые в конце 20-го века высотные разряды в атмосфере Земли, поставили перед учеными множество вопросов и не все они решены к настоящему времени. Наблюдения за высотными разрядами проводятся с Земли, самолетов и спутников, собран большой объем данных, что позволило провести классификацию высотных разрядов и понять основные физические механизмы их развития. К сожалению, проведение измерений непосредственно в области разряда невозможно, так как предсказать место и время его инициации нельзя. Хотя полное количественное лабораторное моделирование, основанное на параметрах подобия, едва ли возможно, отдельные качественные свойства и структурные особенности высотных электрических разрядов можно воспроизвести и дополнительные данные о динамике развития разрядов, возмущении проводимости и химического состава атмосферы могут быть получены.

С точки зрения лабораторного моделирования, наиболее интересными разрядами являются спрайты и гигантские джеты, вследствие значительного занимаемого объема, большой протяженности по высоте и локального влияния на химический баланс атмосферы. Основная трудность при лабораторном моделировании высотных разрядов состоит в создании протяженных градиентов давления газа со значительными перепадами абсолютной величины. В ИПФ РАН создан экспериментальный стенд «Спрайт», позволяющий создавать перепад давления в 2 порядка на разрядном промежутке около метра при импульсном напуске воздуха в предварительно откаченную камеру [1]. В лабораторных условиях удалось получить разряд, одновременно имеющий филаментированную часть в области высокого давления и диффузную в области низкого давления, что повторяет структуру спрайтов и гигантских джетов. Подробно изучено пространственное распределение давления при импульсном напуске воздуха, в зависимости от фонового давления в вакуумной камере [2]. Подобраны режимы работы с минимальной скоростью потока инжестируемого воздуха при максимально возможном перепаде давления на длине установки. Проведена фотосъемка, в том числе высокоскоростная, измерены токи и светимость разряда в различных режимах работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-01182-а).

1. Стриковский А.В., Евтушенко А.А., Гуцин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В. // ФИЗИКА ПЛАЗМЫ. 2017. Т. 43. № 10. С. 1 - 8.

2. Коробков С.В., Гуцин М.Е., Стриковский А.В., Лоскутов К.Н., Евтушенко А.А. // ЖТФ, 2019, том 89, вып. 1, стр. 35 - 41.

ОСОБЕННОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ МЕТОДОМ СОЗДАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ВЫСОКИХ, СРЕДНИХ И НИЗКИХ ШИРОТАХ

Бахметьева Н.В.¹, Грач С.М.², Сергеев Е.Н.², Шиндин А.В.²

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

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

В работе представлены результаты экспериментов по воздействию на ионосферу мощным высокочастотным радиоизлучением нагревных стендов, по возмущению нижней ионосферы с созданием искусственных периодических неоднородностей (ИПН) ионосферной плазмы. Задачей экспериментов являлось развитие метода исследования ионосферы с помощью ИПН на трех нагревных стендах, расположенных в зонах высоких (НААРП), средних (СУРА) и низких широт (Аресибо). Эксперименты проводились в мае-июне 2014 г. на стенде НААРП (62,65 N; 145,25 W), в течение многих лет на стенде СУРА (56,15 N; 46,11 E) и в ноябре 2018 г. на нагревном стенде в Аресибо (18,34 N; 66,45 W). Возмущение в виде искусственной периодической структуры ионосферной плазмы создавалось излучением в зенит мощной радиоволны необыкновенной либо обыкновенной поляризации на частотах от 4 до 6 МГц в квазинепрерывном режиме с «врезками», что позволяло проводить диагностику состояния нижней ионосферы как во время развития ИПН, так и при их релаксации по окончании нагрева. Эффективные мощности излучения в режиме нагрева составляли 70–120 МВт на стенде СУРА, около 100 МВт на стенде в Аресибо и порядка 800 МВт на стенде НААРП. Одновременно с регистрацией ИПН в каждом пункте наблюдений работали ионозонды. Зондирование периодической структуры на стадии ее релаксации осуществлялась переводом нагревного стенда в импульсный режим с излучением импульсов длительностью 20–50 мкс той же частоты и поляризации, что и при нагреве. По изменению во времени амплитуды и фазы сигнала, обратно рассеянного ИПН, в интервале высот 50–120 км определялись время релаксации неоднородностей и скорость вертикального движения плазмы. Время релаксации рассеянного сигнала служит основой для определения целого ряда параметров ионосферы и нейтральной атмосферы [1]. Искусственные периодические неоднородности регистрировались при возмущении ионосферы радиоволнами обеих поляризаций. В целом процессы развития и релаксации неоднородностей, создаваемых радиоизлучением нагревных стендов, были похожи. При работе стенда НААРП ИПН наблюдались на частотах в E- и F-слоях и эпизодически в D-области. На стенде НААРП и СУРА наблюдалось «расслоение» амплитуды рассеянного сигнала в области D [2]. На ионограммах, полученных ионозондами, расположенными вблизи стенда СУРА и стенда в Аресибо, во время воздействия на ионосферу наблюдались рассеянные сигналы вблизи частоты мощной волны. В Аресибо рассеянные сигналы в полосе частот около 1 МГц наблюдались на высотах D-области (60–90 км) при нагреве волной обыкновенной поляризации и на высотах E-области (90–120 км) при нагреве необыкновенной волной.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 5.8092.2017/БЧ (обобщение результатов наблюдений ИПН на стендах СУРА и НААРП) и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-05-00293 (проведение экспериментов на стенде СУРА в 2018 г.).

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

2. Bakhmetieva N.V., Grach S.M., Sergeev E.N., Shindin A.V. et al. // Radio Sci., 2016, **51**, P. 999.

**ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ГЕНЕРАЦИИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ
ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В
ВЫСОКОШИРОТНОЙ F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ
МОЩНЫХ КВ РАДИОВОЛН НЕОБЫКНОВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ**

Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С., Йоман Т.К.

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

Эксперименты по модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами являются эффективным средством для изучения механизмов и физических процессов в ионосферной плазме, ответственных за генерацию и эволюцию ионосферных неоднородностей. Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик, условий и возможных механизмов генерации мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) в *F*-области высокоширотной ионосферы, вызванных контролируемой инъекцией мощных КВ радиоволн необыкновенной поляризации.

Результаты базируются на экспериментах, выполненных на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating в г. Тромсе, северная Норвегия (69.6°N, 19.2°E) с максимальной эффективной мощностью излучения до 1200 МВт, принадлежащим Европейской научной ассоциации EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association). Эксперименты выполнялись в широком диапазоне частот нагрева от 4 до 8 МГц при эффективной мощности излучения от 150 до 800 МВт. Мощная КВ радиоволна необыкновенной (Х-мода) поляризации излучалась в направлении магнитного зенита. Диагностика МИИН осуществлялась с использованием когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS (Co-operative UK Twin Located Auroral Sounding System) в Ханкасалми (Финляндия). CUTLASS работал практически одновременно на трех частотах, что обеспечивало получение характеристик МИИН с масштабами поперек магнитного поля от 7.5 до 15 м. Для анализа привлекались данные EISCAT радара некогерентного рассеяния радиоволн (931 МГц) в Тромсе.

Было установлено, что генерация МИИН при Х-нагреве происходит в регулярной *F*-области ионосферы при спокойных магнитных условиях на частотах нагрева как ниже, так и выше критической частоты слоя *F*2. Времена нарастания МИИН составляли 12 – 120 с, а времена релаксации изменялись от 40 до более, чем 300 с и существенно зависели как от частоты нагрева, так и от условий, предшествующих нагреву («холодный» старт в первом цикле Х-нагрева или последующие циклы Х-нагрева). Пороги возбуждения МИИН при Х-нагреве при «холодном» старте выше, чем при О-нагреве.

По данным измерений EISCAT радара некогерентного рассеяния в Тромсе было обнаружено, что МИИН оказывают существенное влияние на развитие сильной искусственной турбулентности в верхней ионосфере (ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн). Рассмотрены возможные механизмы генерации МИИН при Х-нагреве *F*-области ионосферы. Условия возникновения МИИН позволяют предположить, что их возбуждение связано с генерацией крупномасштабных неоднородностей вследствие самофокусировочной неустойчивости мощного КВ пучка, которые в свою очередь могут «разбиваться» в мелкомасштабные структуры.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СМЕЩЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ЛИНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ВЫСОКОШИРОТНОМ КВ НАГРЕВНОМ КОМПЛЕКСЕ EISCAT/HEATING

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

ААНИИ, Росгидромет, г. Санкт-Петербург, Россия, borisova@aari.ru

Анализ данных радара некогерентного рассеяния (НР) радиоволн (930 МГц) EISCAT в г. Тромсе позволил установить, что при модификации F-области ионосферы мощными КВ радиоволнами обыкновенной (О-мода) поляризации на частотах f_H вблизи гирогармоник электронов ($f_H \sim n \cdot f_{ce}$, $n=4,5$), инициированные нагревом плазменные линии могут возбуждаться в длительные интервалы времени (больше минуты) после включений нагревного комплекса. Результаты базируются на данных многочисленных экспериментов (2011 – 2016 г.г.) на нагревном комплексе EISCAT/Heating в г. Тромсё, Норвегия (69.6° с. ш., 19.2° в. д.; $L=6.2$, $I=78^\circ$). Излучение мощных КВ радиоволн проводилось как на фиксированных частотах излучения f_H , так и при ступенчатом (пошаговом) изменении f_H вблизи четвертой и пятой гирогармоник электронов в диапазонах частот 5.3 – 5.6 и 6.7 – 7.0 МГц соответственно. Комплекс излучал в режимах (2 – 5 – 10 – 20) мин нагрев / (1 – 2 – 5 – 10) мин пауза в направлении магнитного зенита (диаграмма направленности излучающей антенны была ориентирована 12° к югу от вертикали, азимут – 185°). Эффективная мощность излучения на частотах 5.3 – 7 МГц составляла порядка $P_{эфф} \sim 550$ МВт.

Обнаружено одновременное возбуждение нескольких плазменных линий как на частотах близких частоте накачки, так и на частотах, смещенных в сторону увеличения на 100 – 300 кГц. В некоторых экспериментах одновременно регистрировались два смещенных плазменных максимума. Спектральные линии смещенных плазменных линий обладали спектральной шириной, превышающей 100 кГц. Результаты исследований показали, что возбуждение смещенных плазменных линий не может быть объяснено только дисперсионными свойствами ленгмюровской волны в плазме при учете конечной температуры электронов. Был рассмотрен возможный механизм возбуждения смещенных плазменных линий в результате взаимодействия волн Бернштейна, ионосферных плазменных и верхнегибридных волн, возбуждаемых вследствие трансформации волны накачки.

Сопоставление экспериментальных значений Δf_{exp} и численных оценок смещений по частоте плазменных линий в плазме с конечной температурой электронов, Δf_{free} , а также вследствие четырехволнового процесса взаимодействия плазменных волн, Δf_{Bern} , позволяет предположить, что:

- на высотах отражения h_{rf} возбуждение смещенных плазменных линий может быть объяснено дисперсионными свойствами ленгмюровской волны в плазме при учете конечной температуры электронов;
- на верхних гибридных высотах h_{UH} смещенные плазменные линии образуются при взаимодействии волн Бернштейна, ионосферных плазменных и верхнегибридных волн, возбуждаемых вследствие трансформации волны накачки.

ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ НА ОБРАЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

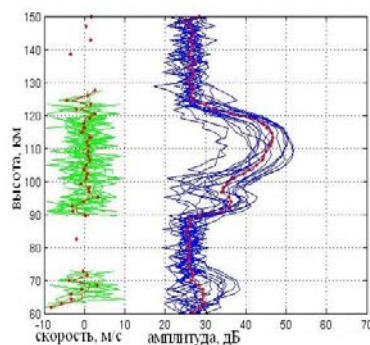
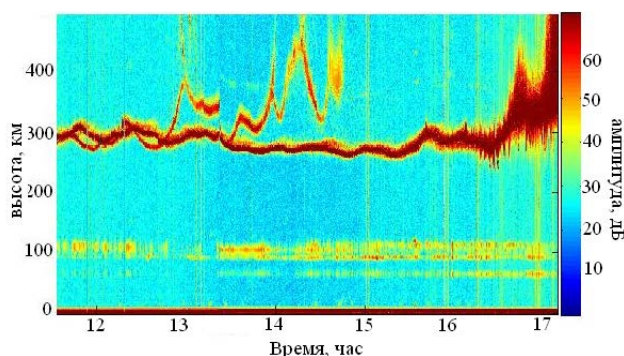
Бахметьева Н.В.¹, Жемяков И.Н.¹, Егеров Е.Н.¹, Калинина Е.Е.², Юсупов К.М.³

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

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

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

В работе представлены результаты экспериментов на стенде СУРА (56,15 N; 46,11 E) по исследованию нижней ионосферы методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях (ИПН) ионосферной плазмы. Эксперименты проводились в годы высокой и низкой солнечной активности, при геомагнитных возмущениях и в спокойных условиях, в условиях распространения перемещающихся ионосферных возмущений и атмосферных волн, развитой турбулентности, при существовании полупрозрачных и экранирующих спорадических слоев E, в заходно-восходный период, в условиях солнечного затмения и в равноденствие. Метод основан на создании искусственных периодических неоднородностей при отражении от ионосферы мощной радиоволны с созданием квазипериодической структуры температуры и концентрации электронов вследствие неравномерного нагрева ионосферной плазмы. Неоднородности рассеивают пробные радиоволны, и при выполнении условия брэгговского рассеяния приемная установка принимает сигнал, интенсивность которого обусловлена синфазным сложением волн, рассеянных каждой неоднородностью [1]. В докладе обсуждаются особенности сигналов, рассеянных неоднородностями, в разных природных условиях. На рисунке в качестве примера приведены регистрации амплитуды сигнала, рассеянного ИПН, в координатах высота-время за 27.09.2018 г. (левая панель), и высотный профиль амплитуды и вертикальной скорости плазмы (правая панель). На рисунке видны множественные отражения: на высотах 60–75 км – сигналы от ИПН в области D, 90–95 км сигнал от спорадического слоя E, на высотах 95–130 км – сигнал от ИПН в E-слое, около 300 км – зеркальное отражение необыкновенной компоненты пробной волны в F-слое. После 16 часов частота воздействия на ионосферу начала приближаться к критической частоте F-слоя, при этом зеркальный сигнал от F-слоя на высоте 300 км приобрел диффузный характер, однако это не сказалось на величине амплитуды рассеянного сигнала.



Работа выполнена в рамках Государственного задания № 5.8092.2017/БЧ (обобщение результатов наблюдений ИПН на стенде СУРА) и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проект № 18-05-00293 (проведение и анализ экспериментов на стенде СУРА в 2018 г.).

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

ДИНАМИКА МЕЗОСФЕРЫ И НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ НА СТЕНДЕ СУРА

Бахметьева Н.В., Вяхирев В.Д., Григорьев Г.И., Жемяков И.Н., Виноградов Г.Р.

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

В работе представлены результаты исследования атмосферной динамики в интервале высот 60–130 км на основе измерений скорости вертикального движения плазмы и температуры нейтральной компоненты. Эксперименты проводились в течение многих лет методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях (ИПН) ионосферной плазмы на нагревном стенде СУРА (56,15 N; 46,11 E). Метод основан на возмущении ионосферы мощным высокочастотным радиоизлучением и создании ИПН в поле стоячей волны, образующейся при отражении от ионосферы мощной радиоволны, излучаемой в зенит синфазно работающими передатчиками стенда. Рассеяние пробных радиоволн на этих неоднородностях обладает резонансными свойствами, то есть принятый от ИПН сигнал имеет значительную амплитуду при равенстве частот и поляризаций мощной и пробной радиоволн. Разрушение (релаксация) неоднородностей после окончания нагрева происходит под действием амбиполярной диффузии в области E и вследствие температурной зависимости коэффициентов прилипания и отлипания электронов в области D[1]. Измерение фазы рассеянного сигнала позволяет определить скорость вертикального движения плазмы, которая на высотах мезосферы–нижней термосферы равна скорости движения нейтральной компоненты. По уменьшению времени релаксации в соответствии с диффузионным законом определяется температура нейтралов. Приведем основные результаты исследования мезосферно-термосферной динамики.

1. Вертикальная скорость имеет переменное направление изменяясь, как правило, в пределах от -10 м/с (движение вверх) до +10 м/с (движение вниз). Большие по сравнению с атмосферной циркуляцией значения скорости свидетельствуют о вкладе атмосферных волн.

2. В большинстве случаев смена направления скорости соответствует высоте максимума спорадического слоя E, что означает образование слоя E_s непосредственно над пунктом наблюдения в результате перераспределения заряженных частиц в магнитном поле Земли.

3. Изменения вертикальной скорости во времени часто имеют волнообразный характер и происходят с периодичностью, характерной для атмосферных гравитационных волн. Наиболее выражены периоды 15, 30 и 60 минут. Вертикальный масштаб волн составлял 5–15 км. Вариации температуры также во многом обусловлены волновыми движениями указанных периодов.

4. В периоды развития неустойчивостей среды наблюдается корреляция вариаций вертикальной скорости и температуры нейтральной компоненты[2].

5. В области перехода от диффузионного разделения газов к турбулентному перемешиванию (ниже высоты турбопаузы) время релаксации неоднородностей перестает подчиняться диффузионному закону и определяется турбулентной диффузией, что позволяет определить скорость турбулентного движения, которая в отдельных случаях может достигать нескольких м/с. Скорости регулярных и турбулентных движений легко разделить по «хаотичному» в последнем случае характеру изменения фазы рассеянного сигнала[1,2].

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 5.8092.2017/БЧ и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-05-00293 (проведение и анализ результатов экспериментов на стенде СУРА в 2018 г.).

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

2. Bakhmet'eva N.V., Grigoriev G.I., Tolmacheva A.V., Kalinina E.E. // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2018.V. 12.No. 3.P. 510.

СВОЙСТВА ИОНОСФЕРЫ В ПЕРИОД ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ БУРИ

Деминов М.Г., Деминова Г.Ф.

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

Планетарный трехчасовой индекс геомагнитной активности ap и средневзвешенные значения этого индекса ($ap(\tau)$) являются основными характеристиками геомагнитной активности в общепринятых эмпирических моделях ионосферы и термосферы. Индекс ap определен так, что он не может превышать 400 нТл, или, что эквивалентно, индекс Kp не может быть больше 9. Существование верхнего предела для этих индексов обусловлено методикой их получения, что приводит к ограничениям использования этих индексов как индикаторов геомагнитной активности для параметров ионосферы и термосферы в периоды максимумов очень интенсивных магнитных бурь.

Один из способов снятия этого ограничения основан на получении эффективного индекса $ap(\tau)$ с помощью нелинейного уравнения регрессии, отражающего связь Dst -индекса с $ap(\tau)$, и экстраполяции этого уравнения в область $ap(\tau) > 400$ нТл. С помощью этого способа на основе известных оценок верхнего предела интенсивности магнитной бури ($Dst_{\min} = -2500$ нТл) было получено предельное (максимально возможное) значение $ap(\tau)_{\max} \approx 1000$ нТл [1].

Другой предлагаемый в данной работе способ основан на дополнительном использовании индекса геомагнитной активности aa , который определен так, что не имеет формального верхнего предела. В этом способе последовательно определяются коэффициенты уравнений регрессии, отражающие зависимости $ap(\tau)$ от $aa(\tau)$ и Dst от $aa(\tau)$. Это позволяет более корректно экстраполировать индекс $ap(\tau)$ в область $ap(\tau) > 400$ нТл на основе экспериментальных значений индексов $ap(\tau)$, $aa(\tau)$ и Dst . Тем самым определяется эффективный индекс $ap(\tau)$ как индикатор геомагнитной активности для параметров ионосферы и термосферы.

На основе данного и предыдущего способов определения эффективных индексов $ap(\tau)$ определены характерные закономерности изменения этих индексов для бури в марте 1989 г., которая была самой интенсивной за всю космическую эру. На основе знания этих индексов для такой экстремальной бури представлены особенности изменений параметров ионосферы и термосферы в этот период. Особое внимание уделено степени изменения параметров ионосферы и термосферы с учетом эффективных индексов геомагнитной активности по сравнению с традиционными способами учета геомагнитной активности в моделях ионосферы и термосферы. Тем самым даны предварительные оценки целесообразности использования эффективных индексов геомагнитной активности в задачах моделирования ионосферы и термосферы в периоды магнитных бурь.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 17-05-004279, и Программой 28 Президиума РАН.

1. Деминов М.Г., Белов А.В., Непомнящая Е.В., Обридко В.Н. // Геомагнетизм и аэрномия 2018. Т. 58. С. 517.

ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ВНУТРЕННЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ ПРИ МОДИФИКАЦИИ F_2 -ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ

Фролов В.Л.^{1,2}, Рябов А.О.¹

1) НИФРИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Н.Новгород, Россия frolov@nirfi.unn.ru

2) КазФУ, г. Казань, Россия

В докладе приводятся результаты исследований характеристик искусственных высыпаний высокоэнергичных электронов с энергиями $E = 70$ кэВ – 2.5 МэВ из внутреннего радиационного пояса Земли. Измерения проводились с апреля по октябрь в 2005 – 2010 гг. с помощью бортового IDP-спектрометра французского микроспутника DEMETER, высота орбиты которого была равна 660 км. Над стандом СУРА спутник пролетал в 18:00÷18:30 UT в поздние вечерние и предполуночные часы. Измерения были выполнены в годы затянувшегося минимума солнечной активности в спокойных или очень спокойных геомагнитных условиях при непрерывном режиме излучения мощной радиоволны.

Анализ полученных результатов показал следующее:

1) максимум интенсивности искусственных высыпаний наблюдался внутри и вблизи возмущённой магнитной силовой трубки, опирающейся на область с сильно развитой турбулентностью;

2) присутствие дакта с увеличенной плотностью плазмы в возмущённой магнитной силовой трубке вызывал усиление интенсивности высыпаний;

3) высыпания регистрировались до 1000 км к северу от станда СУРА и до 300 км к югу от него, поперечные размеры области высыпаний составляли 100 – 200 км;

4) энергия высыпающихся электронов была ~ 100 кэВ;

5) высыпания наблюдались, когда эффективная мощность излучения ВЧ превышала 50 МВт, и имело место эффективное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой F_2 -слоя ионосферы с генерацией интенсивных плазменных возмущений вблизи высоты отражения волны накачки;

6) высыпающиеся энергичные электроны вызывали усиление поглощения радиоволн в нижней ионосфере, что было зафиксировано на ионограммах казанского ионозонда;

7) для «холодного» старта высыпания начинали регистрироваться через ~ 10 мин после начала воздействия мощной радиоволной на ионосферу и наблюдались ещё 10 – 15 мин после его окончания;

8) искусственные высыпания не наблюдались, если измерения проводились в очень спокойных геомагнитных условиях, когда в радиационном поясе отсутствовали высокоэнергичные электроны;

9) искусственные высыпания энергичных электронов были зарегистрированы в магнитно сопряжённой к станду СУРА ионосфере.

Таким образом, можно считать установленным, что модификация ночной среднеширотной F_2 -области ионосферы мощными КВ радиоволнами может стимулировать высыпание энергичных электронов из внутреннего радиационного пояса Земли.

Работа Фролова В.Л. выполнялась при поддержке гранта РФФИ 17-05-00475. Работа Рябова А.О. выполнялась при поддержке государственного задания Минобрнауки России (проект № 3.1844.2017/ПЧ).

ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ДНЕВНОЙ ИОНОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ

Гаврик А.Л.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, alg248@hotmail.com

Важные сведения о структуре ионосферы Венеры получены по результатам радиозатменных экспериментов в миссиях Mariner-5,-10, Венера-9,-10,-15,-16, Pioneer-Venus, Magellan, Venus-Express, Akatsuki. Метод радиозатмений использует связь вызываемых средой изменений частоты и мощности радиоволн с профилем показателя преломления ионосферы для определения ее параметров в диапазоне высот от нижней границы (~90 км) до ионопаузы (от ~230 км до ~1200 км). Достаточно большая серия высотных профилей электронной концентрации при различных условиях освещенности Солнцем и достигнутая точность определения концентрации электронов выявили слоистость структуры ионосферы Венеры. Апробированные модели формирования венерианской ионосферы (аналогичные модели земной ионосферы) указали на физико-химические процессы в обнаруженных слоях, и было показано, что процессы формирования дневной ионосферы Венеры и Земли похожи. Разделение земной ионосферы на слои D, E, F1, F2 обусловлено преобладающими физико-химическими процессами в этих слоях. Чтобы сохранить традиционный физический смысл разделения ионосферы на слои с преобладающими физико-химическими процессами мы обозначим слои на Венере следующим образом: vD, vE, vF1, vF2.

Анализ данных радиопросвечивания показал, что главный максимум ионизации дневной ионосферы Венеры на высоте ~142 км обусловлен влиянием ультрафиолетового излучения Солнца $<1000 \text{ \AA}$, он является аналогом слоя F1 земной ионосферы. Нижний максимум ионизации, заметный в виде перегиба на профилях электронной концентрации $N(h)$ на высоте ~135 км, обусловлен влиянием рентгеновского участка спектра излучения Солнца $10...100 \text{ \AA}$, он является аналогом слоя E земной ионосферы. Оба этих слоя vE и vF1 формируются в условиях фотохимического равновесия. Влияние диффузии плазмы выше ~180 км обычно приводит к изменению шкалы высот профилей $N(h)$, однако данные КА Венера-9,-10 показали возможность существования еще одного максимума $N(h)$ на высоте ~200 км. Моделирование указало, что этот слой vF2, может быть аналогом слоя F2 земной ионосферы. Небольшой по величине локальный максимум $N(h)$ на высоте ~200 км наблюдали и в миссии Pioneer-Venus, но предположили, что его существование обусловлено образованием магнитных жгутов в ионосфере. Детальное моделирование и более точные экспериментальные сведения в будущем помогут лучше понять, какая из гипотез более достоверная.

Традиционный метод вычисления $N(h)$ по данным радиопросвечивания не позволял исследовать ионосферу Венеры ниже 130 км из-за большой погрешности определения $N(h)$ в нижней ионосфере. Разработка нового метода анализа данных на основе обнаруженного инварианта радиозатменного эксперимента открыла возможность получения достоверных сведений о нижней области ионосферы. Применение этого метода выявило ионизованную область vD в диапазоне высот 85...130 км, которая, по-видимому, является аналогом области D земной ионосферы. Эта область vD присутствовала в 19 сеансах радиозатмений для зенитных углов Солнца $56^\circ < Z < 87^\circ$. В 7 сеансах из 9 при $87^\circ < Z < 92^\circ$ нижняя ионосфера проявлялась, но эффект был сравним с помехами. В 25 сеансах при $92^\circ < Z < 160^\circ$ аналогичные слои плазмы на высотах $80 < h < 115$ км отсутствовали.

Работа выполнена при частичной поддержке программы № 28 Президиума РАН.

СТРУКТУРА ВОЗМУЩЕННОЙ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ ИСКУССТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ И ДВУМЕРНЫХ КАРТ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

**Когогин Д. А.¹, Насыров И. А.¹, Шиндин А. В.², Грач С. М.², Сергеев Е. Н.²,
Загретдинов Р. В.¹**

¹ КФУ, г. Казань, Россия, denis.kogogin@gmail.com

² ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия

В работе выполнена обработка экспериментальных данных за 29 августа 2016 года, полученных в ходе проведения совместных измерений искусственных вариаций полного электронного содержания ионосферы и оптического свечения в красной линии атомарного кислорода ($\lambda=630$ нм), стимулированных мощным радиоизлучением стенда «Сура». Экспериментальные данные двухчастотного радиозондирования ионосферы сигналами навигационных спутников были получены на сети из 20-ти ГНСС-станций находящихся на расстоянии до 400 км от стенда.

29 августа 2016 года диаграмму направленности антенной системы (ДН) стенда «Сура» пересекало практически одновременно сразу два спутника: GPS G23 (интервал времени пролёта 19:58 – 20:21 UTC); ГЛОНАСС R08 (интервал времени пролёта 19:49 – 20:12 UTC). Во время пролёта спутника над ДН воздействие на ионосферу осуществлялось циклами: 3 мин нагрев и 3 мин пауза. ДН стенда была ориентирована в Зенит. Частота воздействия 4.3 МГц. Далее было рассчитано ПЭС для всех станций, после чего получено двумерное распределение ПЭС на неравномерной сетке. Для проведения многомерной интерполяции экспериментальных данных был использован многочлен Лагранжа для двух переменных. Результаты обработки экспериментальных данных представлены в виде двумерных карт распределения ПЭС за период времени 19:24 – 21:00 UTC, из которых следует, что: во-первых, магнитуда вариации ПЭС в районе главного лепестка ДН стенда «Сура» составляет ~ 0.3 ТЕСУ; во-вторых, во все стороны (по крайней мере, в восточном, юго-восточном, южном, юго-западном и западном направлениях) от места воздействия распространяются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). Необходимо отметить, что направление распространения этих ПИВ никак не привязано к магнитному полю Земли. Данный факт говорит в пользу того, что мощное радиоизлучение стенда «Сура» оказывает влияние не только на заряженную, но и на нейтральную компоненту верхней атмосферы, и, тем самым, приводит к генерации АГВ и/или ВГВ. Следующим шагом в анализе данных было сопоставление двумерных карт вариаций ПЭС с изображениями ночного неба, полученными с помощью ПЗС камеры SBIG в этот же временной интервал. Проведенные измерения дали возможность провести прямое сопоставление между вариациями искусственного оптического свечения и ПЭС, стимулированных мощным радиоизлучением стенда «Сура» и получить пространственную картину изменения электронной плотности (ΔN_e) в той области ионосферы, где происходит генерация плазменных волн, способных ускорить электроны до потенциала возбуждения оптических уровней.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (№ 17-72-10181).

САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД В ИОНОСФЕРЕ ОТРИЦАТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННОЙ ЗЕМЛИ

Высикайло Ф. И., Некрасов Г.Ю.
МГОУ г. Москва, Россия, filvys@yandex.ru

Впервые проведен аналитический расчет профиля температуры электронов от высоты над отрицательно заряженной Землей. О важной роли параметра E/P в позапрошлом веке в своей работе говорил Столетов. На его работу ссылался Таунсенд, который в многочисленных работах показал, что все процессы рождения и переноса заряженных частиц плазмы определяется не напряженностью электрического поля $-E$, а напряженностью, приведенной к плотности числа частиц $-E/N$. Самостоятельный разряд в любом газе загорается при достижении параметра E/N пробойного значения. Для воздуха $-60 \div 100$ Td (30 кВ/см при атмосферном давлении). Наличие огромного отрицательного заряда Земли в 500 Кл давно известно. Такой заряд приводит к напряженности электрического поля у поверхности Земли $E = 100 \div 130$ В/м. Плотность частиц $-N_0$ поверхности Земли равна $2,7 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Здесь E/N порядка 0,5 Td. Это ничтожные приведенные поля по сравнению с пробойными значениями для воздуха. Однако на высоте в 40 км плотность воздуха в $3 \cdot 10^2$ раз меньше, чем на поверхности Земли и параметр E/N достигает 113Td, что больше пробойных значений воздуха, а температура свободных электронов порядка 2,4 эВ. Это существенно усиливает электрические токи и нагрев плазмы верхних слоёв стратосферы. Следовательно, на этой высоте и выше в поле отрицательно заряженной Земли загорается самостоятельный разряд и с высотой температура электронов возрастает $T_e(E/N)$. Уже при пробойных значениях параметра E/N происходит интенсивное рождение возбужденных молекул кислорода, разрушающих отрицательные ионы и воздух становится электроположительным газом. Таким образом, на этих высотах формируется сферически симметричный слой плазмы самостоятельного разряда в поле отрицательного заряда Земли. О существенном влиянии напряженности электрического поля (заряда Земли) на процессы пробоя ионосферы, на процессы термодиффузии электронов из областей с высокими параметрами E/N и соответственно, с высокими температурами электронов $-T_e$ пока не сообщалось в научной литературе, даже в недавно вышедшей монографиях и обзорах. Исследователи ионосферы Земли и гелиосферы пока не осознали должным образом важность открытия нашего соотечественника Столетова и его последователя Таунсенда о фундаментальной роли управляющего параметра E/N для описания явлений в этих областях знаний. Нами проведены элементарные аналитические расчёты профилей приведенной к плотности частиц воздуха напряженности электрического поля и температуры электронов по соотношению Нернста-Таунсенда (больше известное как соотношение Эйнштейна-Смолуховского, использовавших это соотношение уже после Таунсенда и Нернста). Как показали аналитические оценки профили концентрации электронов в верхней атмосфере и ионосфере существенно зависят не только от УФ ионизации, но и от процессов прямой ионизации в электрическом поле отрицательно заряженной Земли. При этом профили концентрации электронов в переходных слоях (фарадеевых темных пространствах) ионосферы хорошо описываются амбиполярными дрейфом в направлении противоположном напряжённости электрического поля и амбиполярной диффузией Пуассона, обусловленной нарушением нейтральности плазмы. При этом амбиполярные диффузии Эйлера, обусловленная инерционностью ионов и электронов и Шоттки, обусловленная различием температур ионов и электронов оказываются малосущественными.

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

Кириллов А.С., Белаховский В.Б.

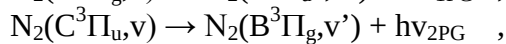
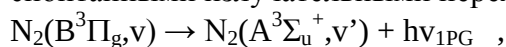
ПГИ, г. Апатиты, Мурманская область, Россия, kirillov@pgia.ru

Радиационные пояса Земли представляют с собой области, в которых заряженные частицы (протоны, электроны) захвачены геомагнитным полем. Электроны внешнего радиационного пояса могут ускоряться до релятивистских энергий (несколько МэВ) во время геомагнитных возмущений. Высыпания в атмосферу являются одним из основных механизмов потерь заряженных частиц внешнего радиационного пояса.

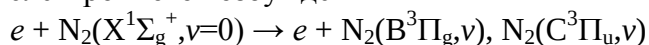
Высыпающиеся релятивистские электроны изменяют химический состав верхней стратосферы и нижней термосферы. Релятивистские электроны проникают до высот средней атмосферы, кроме того на этих высотах они возбуждают тормозное рентгеновское излучение, которое достигает высоты 20 км.

В последние годы появилась серия работ [1-3], связанных с расчетами скоростей ионообразования в атмосфере Земли, вызванного вторжением релятивистских электронов в верхнюю и среднюю атмосферу. Одним из индикаторов состояния атмосферы Земли является ее свечение. Поскольку молекулярный азот доминирует в составе атмосферы Земли, спектры свечения должны содержать множество полос азота.

Впервые проведены расчеты профилей скоростей свечения полос первой положительной (1PG) и второй положительной (2PG) систем молекулярного азота, обусловленных спонтанными излучательными переходами



на разных высотах верхней и средней атмосферы во время вторжения в атмосферу релятивистских электронов (от 100 кэВ до 10 МэВ). При этом были учтены процессы электронного возбуждения



вторгающимися в атмосферу релятивистскими частицами и вторичными электронами, процессы спонтанного излучения, а также перенос энергии возбуждения молекул между триплетными состояниями при молекулярных столкновениях. Константы скоростей переноса энергии возбуждения между различными триплетными состояниями при столкновениях с молекулами N_2 и O_2 были теоретически рассчитаны согласно квантово-химическим приближениям [4-6].

Впервые показано, что для полос 1PG системы N_2 наблюдается значительное уменьшение скоростей излучения на нижних высотах (ниже ~60 км) по сравнению со свечением полос 2PG системы и скоростями ионообразования, что связано со значительным ростом скоростей гашения при молекулярных столкновениях по сравнению с вероятностями излучательных переходов на нижних высотах.

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

1. Artamonov A.A. et al., 2016, J. Geophys. Res., v.121, p.1736-1743.
2. Artamonov A.A. et al., 2016, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., v.149, p.161-166.
3. Artamonov A.A. et al., 2017, Adv. Space Res., v.59, p.2295-2300.
4. Kirillov A.S., 2011, J. Quant. Spec. Rad. Trans., v.112, p.2164-2174.
5. Kirillov A.S., 2016, Chem. Phys. Lett., v.643, p.131-136.
6. Kirillov A.S., 2019, Chem. Phys. Lett., v.715, p.263-267.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА СУРА НА НИЖНЮЮ ИОНОСФЕРУ

Костров А.В., Фролов В.Л., Янин Д.В., Галка А.Г.

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

В данной работе представлены результаты исследований распространения СДВ станций во время нагрева ионосферы мощной КВ радиоволной, излучаемой стендом СУРА. Амплитуда СДВ станций измерялась с помощью двух идентичных электрических антенн: одна антенна располагалась вблизи нагревного стенда, другая — в нескольких километрах от него. Одновременно проводились измерения величины постоянного электрического поля, которая определялась разностью потенциалов между нижней ионосферой и землей. Для измерений возмущения постоянного электрического поля использовались разработанные в ИПФ РАН два вибрационных датчика. Один располагался вблизи нагревного стенда, второй — в трех километрах от него.

Воздействие излучения нагревного стенда СУРА на ионосферу осуществлялось волнами *О*-поляризации на частоте 4300 кГц с эффективной мощностью $P_{\text{эфф}} = 45$ МВт. Основной режим излучения волны накачки (ВН) был: 10 мин – излучение, 10 мин – пауза. Измерения проводились в утренние, дневные и вечерние часы.

Было установлено, что модификация ионосферы мощной радиоволной приводило к уменьшению амплитуды принимаемых СДВ станций. Эффект воздействия зависел от времени суток, уровня геомагнитной активности и от места расположения приемника относительно стенда. Для приемника, расположенного на стенде СУРА ослабление сигнала СДВ станций регистрировалось в утренние и вечерние часы; в полуденное время величина такого ослабления была значительно меньше. Вдали от стенда СУРА регистрировалось, как правило, возрастание сигналов СДВ станций, в некоторых сеансах наблюдалось отсутствие возмущений. Важно отметить, что измерения возмущений вне стенда проводились под линиями электропередач, что приводило к существенному увеличению интенсивности принимаемых сигналов. Установлено, что характерные времена развития ослабления и его исчезновения после включения (выключения) ВН составляли десятки секунд.

Результаты измерений постоянного электрического поля во время модификации ионосферы показывают уменьшение амплитуды поля как вблизи стенда, так и на расстоянии 3 км от него. С увеличением интенсивности волны накачки амплитуда возмущений электрического поля возрастала. Эффект возмущения электрического поля, в основном, наблюдался в дневное время.

Выполненные эксперименты показывают наличие сильного влияния нижней ионосферы (в первую очередь, ее *E*-слоя) на взаимодействие мощной КВ радиоволны с плазмой верхней ионосферы. Сами наблюдаемые эффекты носят сложный характер и зависят от многих факторов.

Эксперименты на стенде СУРА были поддержаны грантом Минобрнауки № 3.1844.2017/ПЧ.

КАКИЕ МОДЕЛИ НЕОБХОДИМО РАЗРАБАТЫВАТЬ В ИНТЕРЕСАХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ САНТИМЕТРОВОГО, ДЕЦИМЕТРОВОГО И МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Козлов С.И.^{1,2}, Аксенов О.Ю.², Беккер С.З.^{1,2}, Ляхов А.Н.¹, Яким В.В.^{1,2}, Якубовский С.В.²

¹ИДГ РАН, г. Москва, Россия, s_kozlov@inbox.ru

²НИИЦ ЦНИИ Войск ВКО, г. Москва, Россия

Как известно, ионосфера заметно влияет на распространение широкого диапазона длин радиоволн, включая сантиметровый (СМ), дециметровый (ДЦМ) и метровый (М). Заметим, что в этом диапазоне функционируют наиболее важные РЛС гражданского и оборонного назначения [1,2].

В настоящее время существует несколько способов компенсации негативного влияния ионосферы на РЛС. Одним из них является использование моделей ионосферы совместно с измерениями полного электронного содержания с помощью глобальных навигационных систем GPS или ГЛОНАСС. Цель доклада – определить ионосферные модели, которые целесообразно использовать в интересах РЛС СМ, ДЦМ и М диапазонов.

Все модели ионосферы можно разбить на два больших класса – исследовательские и прикладные. Дается детальная классификация последних по самым различным признакам [3]: методам построения, физической сущности, диапазону высот и др. Формулируются общие требования к моделям с учетом задач, которые должны решать рассматриваемые РЛС, их географической дислокации и некоторых технических характеристик (потенциала, длины волны, режимов работы, расположения секторов обзора) [4].

На основании анализа 8-ми наиболее известных отечественных и зарубежных прикладных моделей ионосферы показывается, что ни одна из них по разным причинам хотя бы примерно не удовлетворяет всем требованиям. Наиболее перспективными представляются вероятностно-статистические модели, которые в принципе могут в той или иной степени соответствовать этим требованиям. В первом приближении из-за острой необходимости следует пользоваться моделью ИЗМИРАН и ИПГ Росгидромета, представленной в качестве ГОСТа РФ; в крайнем случае осторожно и ограниченно – моделями IRI или их разновидностью моделью NeQuick.

1. Коллектив авторов. Щит России. Системы противоракетной обороны. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. 502с
2. Коллектив авторов. Мощные надгоризонтные РЛС дальнего обнаружения. Разработка. Испытания. Функционирование. Под редакцией С.Ф. Боева. М.: Изд. «Радиотехника». 2013. 168с.
3. Аксенов О.Ю., Беккер С.З., Дюжева М.М., Козлов С.И., Ляхов А.Н., Якубовский С.В. Обоснование необходимости разработки и применения вероятностно-статистических моделей ионосферы в интересах радиолокационных средств РКО // Сб. докладов V-й Всерос. научно-технической конф. «РТИ Системы ВКО-2017». 25 мая 2017. Москва. с.31-38.
4. Козлов С.И., Ляхов А.Н., Якубовский С.В., Беккер С.З., Гаврилов Б.Г., Яким В.В. Обоснование требований к моделям ионосферы, используемым в радиолокационных системах дециметрового и метрового диапазона длин волн. Сб. докладов V Всерос. научн.-техн. конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». 23-25 мая 2018г. ВКА имени А.Ф.Можайского. г. Санкт-Петербург., с. 455-457.

ЭВОЛЮЦИЯ ГАЗОПЫЛЕВОГО ОБЛАКА В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ 26 ОКТЯБРЯ 2017 ГОДА

Платов Ю.В., Николайшвили С.Ш.

ИЗМИРАНРАН, г. Москва, Россия, yplatov@mail.ru

Природные оптические явления естественного происхождения в верхней атмосфере, доступные визуальным наблюдениям, относительно немногочисленны. К ним относятся полярные сияния, метеорные явления, серебристые облака, а также явления, связанные с электрическими разрядами в ионосфере. Сюда же должно быть отнесено и собственное свечение атмосферы, которое, впрочем, может наблюдаться невооруженным глазом только из космоса.

Но начиная с середины прошлого столетия интенсивное развитие ракетно - космической техники привело к появлению особенного класса оптических явлений, связанных с антропогенным воздействием на окружающую среду. Эти явления не имеют природных аналогов и, вероятно, поэтому долгое время они воспринимались очевидцами как нечто аномальное.

Основным механизмом развития оптических эффектов в верхней атмосфере и ОКП, связанных с запусками мощных ракет, является рассеяние солнечного излучения на продуктах сгорания ракетного топлива, образующихся при работе ракетных двигателей. Состав продуктов сгорания ракетного топлива существенно различается для жидкостных и твердотопливных ракетных двигателей, и это определяет различия явлений, сопровождающих их запуски.

Исследования подобных явлений могут быть использованы для изучения физических условий и процессов в верхней атмосфере и ОКП [1].

26 октября 2017 г. «странное» оптическое явление наблюдалось в северных регионах России. Это явление было связано с проведением запусков ракет в рамках «тренировки по управлению стратегическими ядерными силами России» [2].

В работе представлены результаты исследования динамики облака продуктов сгорания твердого топлива, образовавшегося при разделении ступеней ракеты. Проанализирована последовательность цифровых изображений, полученных в сумеречных условиях с расстояния ~ 1500 км. Высота центра облака достигает ~ 900 км, а его диаметр ~ 2000 км. Полученные данные позволяют оценить дисперсный состав облака и динамические параметры его развития. Предложенная методика может быть использована для уточнения физической картины взаимодействия продуктов сгорания твердого топлива с окружающей средой.

1. Оптические явления, наблюдающиеся при запусках и эксплуатации ракетно-космической техники С.437-482. Гл. 9. / Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду. Ред. В.В. Адушкин, С.И. Козлов, М.В. Сильников. М.: ГЕОС. 794 с. 2016.

2. <https://www.youtube.com/watch?v=JKdrOGaw9eg>. 2017

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ ВБЛИЗИ ЧЕТВЕРТОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ГИРОГАРМОНИКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАКЛОНАХ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ СТЕНДА НАARP

Шиндин А.В., Смолина В.П., Сергеев Е.Н., Грач С.М., Погорелко Н.А.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, shindin@rf.unn.ru

В марте 2011 г. на стенде НАARP была проведена серия экспериментов по исследованию искусственной ионосферной турбулентности с помощью измерений искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) при различных углах наклона диаграммы направленности (ДН) антенной системы стенда к вертикали. Угол наклона ДН к вертикали в плоскости геомагнитного меридиана изменялся последовательно в пределах от -28° (на север) до $+28^\circ$ (на юг), с шагом 7° , при углах 7° , 14° и 21° на юг ДН включала в себя направление магнитного зенита. Для каждого значения угла осуществлялось свипирование частоты волны накачки f_0 в диапазоне $5930 \rightarrow 5730 \rightarrow 5930$ кГц (вблизи 4-й гармоники электронной циклотронной частоты f_c) с шагом 1 кГц в течение 80 с. Прием ИРИ осуществлялся в трех пунктах, расположенных вдоль магнитного меридиана в 113 км, в 82 км и 11 км к югу от стенда НАARP. В настоящем докладе изложены свойства ИРИ, выявленные в результате детальной обработки экспериментальных данных. В частности:

1. Интенсивность ИРИ (всех его спектральных компонент) значительно уменьшалась при углах наклона ДН на север (до -15 дБ) по сравнению со случаем вертикального воздействия. При наклонах на юг вариации интенсивности ИРИ в пределах 0-5 дБ не носили регулярного характера в зависимости от угла наклона ДН.
2. При углах наклона 7° , 14° , 21° на юг при $f_0 = 4f_c$ соотношение сигнал/шум для компоненты Downshifted Maximum (DM) было больше 15 дБ, а максимальная зарегистрированная интенсивность этой компоненты в течение свипирования было на 10÷15 дБ выше, чем при других углах наклона. При тех же углах наклона максимальная интенсивность компоненты Broad Upshifted Maximum (BUM) наблюдалась при $f_0 - 4f_c = 18 \div 25$ кГц. При других углах максимальная интенсивность BUM имела место для $f_0 - 4f_c = 60 \div 80$ кГц.
3. При углах наклона 7° , 14° , 21° на юг в спектрах ИРИ наблюдалась компонента BUM Descending (BUM_D), связанная с возбуждением слоя дополнительной (искусственной) ионизации. При свипировании вниз ($5930 \rightarrow 5730$ кГц) компонента BUM_D наблюдалась вблизи основной компоненты BUM, а при свипировании вверх ($5730 \rightarrow 5930$ кГц) – на значительно больших отстройках от f_0 . Это может означать, что при свипировании вниз слой дополнительной ионизации практически примыкает снизу к области генерации основного ИРИ («стационарного» BUM), а при свипировании вверх оказывается заметно ниже этой области.
4. В описываемом эксперименте зависимость частотной отстройки положения пика «стационарного» BUM от частоты волны накачки $\Delta f_{BUM} = f_{BUM} - f_0$ от f_0 была линейной с угловым коэффициентом $0.6 \div 0.7$, ($\Delta f_{BUM} \sim 0.6 \div 0.7 f_0$), в отличие от предыдущих экспериментов на стендах EISCAT и СУРА, где угловой коэффициент был близок к 1 [1].

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

1. Leyser T.B. // Space Science Reviews. 2001. V. 98(3). P. 223.

ВЕРИФИКАЦИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н., Ряховский И.А., Поклад Ю.В.

ИДГРАН, г. Москва, Россия, susanna.bekker@gmail.com

Результаты многолетнего непрерывного мониторинга радиофизических характеристик сигналов СДВ диапазона свидетельствуют о существовании значительных вариаций амплитуды и фазы радиоволны даже в спокойных гелиогеофизических условиях. Исходя из современного понимания физики распространения радиоволн можно сделать вывод, что наблюдаемые вариации связаны с непрерывным изменением ионосферных параметров. Анализ существующих методов описания среды распространения СДВ радиосигналов показывает, что наиболее корректно среда может быть описана вероятностными моделями.

Вероятностно-статистические модели позволяют получить функции плотности вероятности ионосферных параметров, которые учитывают изменчивый характер нейтральных и заряженных составляющих ионосферы. Целью работы является верификация полученных вероятностных полей ионосферных параметров по данным наземных радиофизических измерений.

Для сопоставления результатов расчетов высотных профилей электронной концентрации, полученных по вероятностно-статистическим моделям *D*-области ионосферы [1, 2], были использованы амплитуды СДВ сигналов, принятых в подмосковной геофизической обсерватории «Михнево» (55° с.ш., 38° в.д.) от шести передатчиков, расположенных от 45° с.ш. до 64° с.ш.

Из-за отсутствия информации о мощности передатчиков при верификации было использовано не абсолютное значение амплитуды радиоволны, а разность амплитуд ΔA в [дБ] (суточное изменение величины или разность амплитуд на разных частотах от одного передатчика). Для оценки работоспособности вероятностно-статистических моделей были сопоставлены наиболее вероятные величины (точки абсолютного максимума) теоретических и экспериментальных функций плотности вероятности $P(\Delta A)$.

Проведенная верификация подтвердила правомерность основных положений вероятностно-статистического моделирования и возможность использования построенных моделей для прогноза состояния параметров нижней ионосферы. В большинстве гелиогеофизических условий отклонения модельных значений от измеренных в обсерватории Михнево лежат в пределах экспериментальных вариаций величины и не превышают 20 %.

1. Козлов С.И., Ляхов А.Н., Беккер С.З. // Геом. и аэрон. 2014. Т. 54. № 6. С. 767–779.
2. Беккер С.З. // Солнечно-земная физика 2018. Т. 4. № 3. С. 84–94.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ В ИОНОСФЕРЕ (АКТИВНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)

Зецер Ю.И., Гаврилов Б.Г., Поклад Ю.В., Ковалев А.Т.

ИДГ РАН, г. Москва, Россия, zetterj@hotmail.com

Изучение энергообмена в системе космические потоки плазмы - окружающая среда, связанного с перераспределением энергии плазменных потоков на возбуждение гидродинамических волн, развитие неустойчивостей и нагрев ионосферы, а также исследование обратного влияния окружающей среды на динамику плазменных потоков [1, 2] является важной фундаментальной и прикладной задачей. Эффективным и надежным инструментом исследований этих явлений является лабораторное и натурное моделирование.

Проведенные в 1997, 2000 г.г. активные эксперименты в ионосфере “Fluxus” и “North Star” [3-5] использовали в качестве средства воздействия на геофизическую среду плотные высокоскоростные плазменные струи, получаемые от мощных генераторов взрывного типа. Инжекция плазмы под различными углами к силовым линиям геомагнитного поля в диапазоне высот от 140 до 380 км дало возможность исследования различных этапов взаимодействия плазменной струи с геофизической средой на временах от десятков микросекунд до сотен секунд.

В “Fluxus” исследовались физические механизмы и эффекты взаимодействия плазменных струй с фоновой средой при распространении вдоль геомагнитного поля, а в эксперименте “North Star” – поперек поля. Было проведено две инъекции плазмы, отличающихся тем, что в первой из них на пути струи было создано облако нейтрального газа с целью повышения ионизации плазмы за счет взаимодействия нейтралов струи и воздуха. Результаты измерений параметров плазмы, магнитного поля и фоновой среды показали, что пробег струи на начальной стадии определяется инерцией не плазмы, а нейтрального газа, содержащегося в струе. Торможение струи плазмы, движущейся поперек магнитного поля, вызвано генерацией альфвеновской волн и возникновением продольных токов. Были экспериментально исследованы связь диамагнитного эффекта и перемагничивания плазменного образования с плотностью плазмы и возможностью генерации продольных токов. В эксперименте были зарегистрированы генерация и распространение магнитозвуковой волны перед плазменной струей. По мере падения скорости струи амплитуда поля в магнитозвуковой волне уменьшается..

Одним из наиболее интересных результатов эксперимента являлось сохранение высокой плотности плазмы при ее распространении на значительные расстояния. Показано, что в эксперименте продемонстрирован эффект альфвеновской ионизации или критической ионизационной скорости (CIV). В отличие от проведенных ранее космических экспериментов, где доля роста концентрации, которая могла быть отнесена на счет CIV составляла доли или единицы процентов, в эксперименте «North Star» зафиксирован рост концентрации плазмы не менее, чем на порядок.

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

1. Зецер Ю.И., Гаврилов Б.Г., Жмайло В.А. и др. // ФГВ. 2004. Т. 40. № 6. С. 31.
2. Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Подгорный И.М. и др. // Косм. исслед. 2003. Т. 41. № 1. С. 33.
3. Gavrilov B.G., Podgorny I.M., Zetter J.I. et al. // J Spacecr Rockets. 2004. V. 41. N 4. P. 490.
4. Pfaff R.F., Freudenreich H.T., Bounds S.R., et al. // J Spacecr Rockets. 2004. V. 41. N 4. P. 521.
5. Erlandson R.E., Meng C.I., Swaminathan P.K., et al. // J Spacecr Rockets. 2004. V. 41. N 4. P. 483.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ПО МОДЕЛИ IRI-2016 И МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ В КАЧЕСТВЕ НОВОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА РОССИИ (ГОСТ 25645.146). ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Яким В.В., Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н.

ИДГ РАН, г. Москва, Россия, 12-2220@list.ru

Проводится сравнение результатов расчетов высотного распределения электронов (N_e) и полного электронного содержания (ПЭС) по моделям IRI-2016 [1] и SIMP[2], представленной в качестве ГОСТ РФ. Цель сравнения – оценка качества и преимуществ той или иной модели при возможном использовании в радиолокационных системах сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов длин волн

Расчеты проводились для невозмущенных условий на различных широтах в точках с географическими координатами (г. Алеппо, г. Севастополь, г. Воронеж, г. Москва, г. Мурманск, арх. Земля Франца Иосифа, арх. Новая Земля и арх. Северная Земля), для двух уровней солнечной активности (СА) ($F_{10,7}=70$, $F_{10,7}=170$), двух времен суток (0ч LT(ночь), 12ч LT(день)). Для анализа были выбраны даты 15 января, 2 апреля и 15 июля 2018г.

Критериями качества моделей являлись известные физические соображения: 1) с ростом СА $N_e(h)$ и ПЭС должны увеличиваться, 2) с ростом широты $N_e(h)$ и ПЭС должны уменьшаться, 3) в ночных условиях $N_e(h)$ и ПЭС имеют очевидную тенденцию к уменьшению, а высоты F2 области к увеличению.

Результаты сравнения сведены в таблицу, в которой знаки «+» и «-» обозначают лучшее и худшее качество.

Критерий качества	СА		Широта		Время суток	
Модель	IRI-2016	SIMP	IRI-2016	SIMP	IRI-2016	SIMP
Оценка качества	-	+	-	+	±	±

Заметим, что вклад в ПЭС внешней ионосферы ($h>600$ км) составляет по обеим моделям ~15-25%.

Окончательный вывод по предпочтению той или иной модели можно сделать только после сравнения теоретических расчетов с экспериментальными геофизическими и радиофизическими данными.

1. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. V. 15. № 2.Р. 418-429. 2017. DOI: 10.1002/2016SW001593
2. В.Б. Лапшин, А.Д. Данилов, В.В. Михайлов, К.Г. Цыбуля, В.И. Денисова, А.В. Михайлов, М.Г. Деминов, А.Т. Карпачев, В.Н. Шубин. Модель SIMP как новый государственный стандарт распределения концентрации электронов в ионосфере (ГОСТ 25645.146). Пленарный доклад на XXV Всероссийской открытой конференции «Распространение радиоволн». г. Томск. 3-9 июля 2016г. ИОА СО РАН.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ, МЕДЛЕННЫХ
МАГНИТОЗВУКОВЫХ И ВИСТЛЕРНЫХ ВОЛН, СОЗДАВАЕМЫХ
ПЕРИОДИЧЕСКИМИ СГУСТКАМИ ПЛАЗМЫ В СИЛОВОЙ ТРУБКЕ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ: ЛАБОРАТОРНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**Тищенко В.Н., Березуцкий А.Г., Бояринцев Э.Л., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б.,
Пономаренко А.Г., Посух В.Г., Шайхисламов И.Ф.**

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, tvn25@ngs.ru

В ИЛФ СО РАН предложен “резонансный” метод взаимодействия периодических сгустков лазерной плазмы с газами и замагниченной плазмой [1- 5]. Метод позволяет генерировать инфра- ультразвук на большом расстоянии от лазера, а в космосе одновременно два типа квазистационарных волн (КВ) - медленную магнитозвуковую (МКВ) и крутильную Альфвеновскую (АКВ), которые переносят энергию и импульс сгустков на большое расстояние вдоль магнитной силовой трубки.

В настоящее время с использованием расчетов на супер эвм и экспериментов на стенде КИ-1 получены следующие результаты.

1. Периодические сгустки плазмы взрывного типа, например лазерной, формируют в магнитной силовой трубке квазистационарную волну, которая распространяется со сверхзвуковой скоростью сотни км/с и переносит продольный импульс сжатой плазмы фона. Азимутальный импульс переносит Альфвеновская волна, скорость которой в несколько раз больше. На малых высотах скорости Альфвеновской и медленной магнитозвуковой волн примерно равны, в результате формируется поток плазмы, в котором импульс содержится преимущественно в азимутально вращающейся плазме фона. Высокое давление на переднем фронте обуславливает формирование головной ударной в фоне.
2. Впервые показано, что сгустки плазмы при определенных условиях генерируют интенсивные кумулятивные вистлеры: распространяются в узкой силовой трубке магнитного поля, переносят сильные вариации магнитного поля со скоростью несколько тысяч км/с, Вистлеры содержат высокочастотный пакет и низкочастотный след, длина которого линейно зависит от количества сгустков.
3. Для создания вистлеров применимы сгустки плазмы с начальной скоростью разлета, соответствующей широкому диапазону Альфвеновских чисел Маха $\sim 0.5 \div 7$, что существенно расширяет возможности практической реализации вистлеров.
4. Периодические сгустки плазмы генерируют АКВ и МКВ или АКВ и МКВ и вистлеры (переходной режим) или только вистлеры.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0307-2017-0015, при частичной поддержке Программой фундаментальных исследований РАН № 56. Расчеты проводились на кластерах МГУ, НГУ и ССКЦ СО РАН

1. Тищенко В.Н. Квантовая электроника, 2003, т.33, № 9, с. 823
2. Грачев Г.Н., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н. и др. Квантовая электроника. 2006, № 5.
3. В.Н. Тищенко, И.Ф. Шайхисламов, А.Г. Березуцкий. Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности: Альманах /Под редакцией ак. В.А. Садовниченко, ак. Г.И. Савина, чл.-корр. Вл.В. Воеводина. М.: Издательство МГУ, 2014, с. 65 - 74
4. В.Н. Тищенко, Ю.П. Захаров, И.Ф. Шайхисламов, А.Г. Березуцкий, и др. ПЖЭТФ, 2016, т.104, в.5, с.302
5. В. Н. Тищенко, А. Г. Березуцкий, Э. Л. Бояринцев, Ю. П. Захаров, и др. Квантовая электроника, 2017, т. 47, № 9, с. 849.

**РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ИОНОСФЕРЕ НАД
СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫМИ РЕГИОНАМИ В ПЕРИОДЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
2010 Г. В СПОКОЙНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ**

Титова М.А.^{1,3}, Захаров. В.И.^{2,5}, Пулинец С.А.¹, Hernández-Pajares M.⁴

¹ *ФГБУ Науки ИКИ РАН, г. Москва, e-mail:marititova@yandex.ru*

² *Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, г.Москва, Россия*

³ *ФГБУ Науки ИЗМИРАН, г. Москва, г.Троицк, Россия*

⁴ *UPC-IonSAT, Polytechnical University of Catalonia, 08034 Barcelona, Spain*

⁵ *ФГБУ Науки ИФА РАН, г. Москва, Россия*

В настоящее время известно, что в преддверии произошедших сейсмических событий в ряде конкретных географических регионов мира в ионосфере над эпицентрами землетрясений были зафиксированы специфические неоднородности электронной плотности. Задачу о месте определения источников таких начальных возмущений, необходимо рассматривать особо, поскольку он требует учета процессов передачи энергии из различных геосферных, а также космических источников в ионосферу.

Диагностика состояния ионосферы, посредством обнаружения фазовых и амплитудных аномалий на трассах распространения радиоволн позволяет наблюдать за процессами перестройки областей земной атмосферы.

В работе рассмотрены примеры локализации выявленных неоднородностей ионосферы для случаев, когда удается связать указанные возмущения с конкретными источниками региона о.Гаити в период 01-15 января 2010г., и региона группы землетрясений в Чили в период 18 февраля–21 марта 2010г. Геомагнитная обстановка в указанные периоды была для Гаити до 20 нТл, для Чили до 25 нТл, в целом невозмущенной.

Нами были обработаны данные станций наземного базирования, объединенных в глобальные (IGS и UNAVCO) сети. Для анализа сейсмособытий на Гаити были выбраны 67 наземных станций, что позволило сформировать 27 измерительных ячеек подсети. Обработаны 43 млн. отсчетов фазы или более 7,5 тыс. часов индивидуальных наблюдений. Станции наземного базирования в основном расположены на побережье Мексиканского залива. Для землетрясения в Чили нами использовались данные 56 станций, что позволило сформировать всего 15 измерительных ячеек, лежащих, в основном, на севере континента и вдоль побережья Тихого океана. Обработаны 10,3 млн измерений фазы на обеих рабочих частотах или свыше 43 тыс. час индивидуальных наблюдений. Проведенный анализ спектров выделенных волновых структур, имеющих скорости, соответствующие АГВ (от 300 до 1200 м/с), показывает, что именно в период после значительных сейсмособытий изменяется параметр спада α волнового спектра $S(k) \sim k^{-\alpha}$, $k = 2\pi/\lambda$, λ - характерный размер волнового возмущения, причем запаздывание отклика ионосферы на конкретные события от 8 до 12 часов.

Общий анализ полученных данных показывает, что над сейсмически активными районами происходят интенсивные изменения параметров ионосферы, относительно показателей их регулярной изменчивости, не только во время основного события, но также в период подготовки землетрясений, и после его активной фазы. Причем источником неоднородных структур является не только будущий эпицентр, но и вся область подготовки землетрясения: активные континентальные и океанические разломы, зоны субдукции, границы тектонических плит.

Геофизический анализ результатов позволяет установить, что неоднородные структуры ионосферы, обнаруженные методом GPS-интерферометрии на выбранной наблюдательной сети, географически связаны с местами орографических возмущений. Например, с нагонными явлениями и волнами на мелководье, а также с образованием турбулентных вихрей при изменении подстилающей поверхности: при выходе ветровых масс на сушу. Это затрудняет литосферную интерпретацию наблюдаемых явлений.

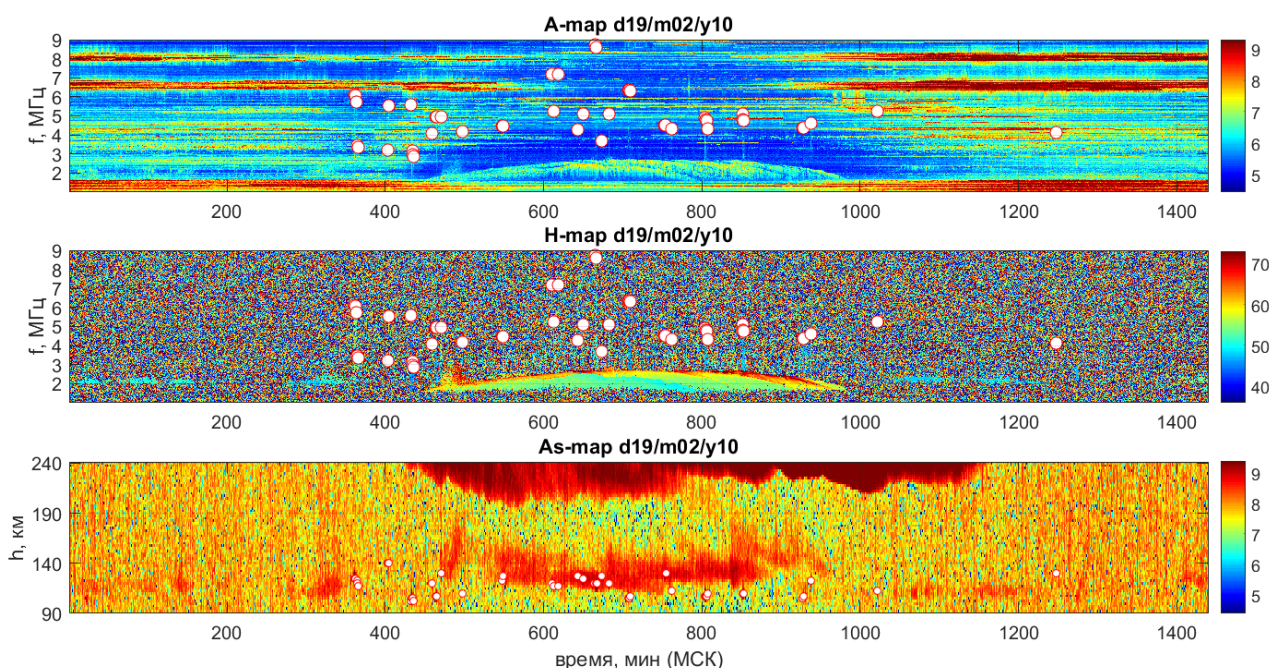
СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОРОТКОЖИВУЩИХ ES ПО ДАННЫМ 2010 ГОДА

К.М. Юсупов¹, А.Д. Акчурина¹, О.Н. Шерстюков¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет", г. Казань, Россия

В работе представлены результаты экспериментов на ионозонде «Циклон» Казанского Федерального университета по исследованию короткоживущих/транзиентных Es-слоев методом вертикального зондирования ионосферы с одномоментной периодичностью регистрации ионограмм на основе статистического анализа данных, полученных в 2010 г. Анализ проводился с помощью алгоритма интерактивной-ручной обработки А-карт (пример – на нижнем рисунке), получаемых детектированием максимумов амплитуды отраженных сигналов на ионограммах. На А- и Н-картах отмечались предельные частоты таких Es, а на As-карте – действующая высота (белые кружочки на рисунке). Для достоверности результатов был выбран интервал времени ~2недели, когда произведена одновременная обработка как А-карт, так и непосредственно ионограмм, при этом получены схожие статистические результаты. Таким образом для исследования статистических данных появляемости транзиентных Es, а также их критических частот и высот расположения, метод исследования А-карт является приемлемый.

Анализ статистики появляемости транзиентных Es в 2010г. показал их повышенную активность в периоды основных метеорных потоков северного полушария (Квадрантиды, Персеиды, Геминиды, Урсиды), что связывает их с метеорной природой происхождения.



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

НАБЛЮДЕНИЕ ЗАГОРИЗОНТНОГО ЭХА ОТ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ Е СЛОЯ В ДЕЦИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН.

Тютин И.В., Оводенко В.Б., Успенский М.В.

ОАО «НПК «НИИДАР», г. Москва, Россия, ityutin@niidar.ru

"Отражения" ультракоротковолновых радиоволн от авроральной ионосферы, например ракурсное рассеяние радиоволн, известно и изучается уже около 80 лет. Это явление связано с анизотропным рассеянием радиоволн на полеориентированных флуктуациях концентрации плазмы, известных как неоднородности аврорального Е-слоя ионосферы. Последние создают сильные и обширные помехи для радаров УКВ диапазона. Так как они образуются из-за флуктуации плазмы Е-слоя, принято считать, что дальность их появления ограничена радиогоризонтом Е-слоя ~ 1200 км.

Данные УКВ радаров сопровождения спутников с чувствительностью порядка 10^{-17} м^{-1} (для эталонной дальности 1000 км) позволили обнаружить ряд эхо-сигналов с дальностей от 1300 до 1800 км. Прямолинейная высота таких эхо-сигналов лежала в диапазоне 130-200 км, где обратное рассеяние в F-слое не могло наблюдаться из-за больших ракурсных углов.

Данные более ранних исследований (Успенский и др., 1993) и наши результаты моделирования позволяют рассматривать эхо-сигналы с дальностей 1300 – 1800 км (при углах места $< 4^\circ$) как авроральные (субавроральные) эхо-сигналы ракурсного рассеяния радиоволн (PPP) в Е-слое. Явления PPP сигналов с больших дальностей может быть вызваны промежуточным слоем D, метеорами ниже или выше слоя рассеяния.

ОСОБЕННОСТИ ИОНОСФЕРНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ КРУПНЫХ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ 2014 ГОДА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ SWARM

Захаров В.И., Пилипенко В.А., Грушин В.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия, zvi_555@list.ru

Институт Физики Атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия

На атмосферу и ионосферу Земли оказывают влияние различные процессы, протекающие как в околоземном космическом пространстве, так и в нижней атмосфере. В настоящее время считается доказанным, что сильные метеорологические возмущения могут оказывать влияние и на ионосферу. Механизмы взаимодействия геосфер и передачи на ионосферные высоты атмосферных воздействий изучены явно недостаточно. В настоящее время они представляют собой набор нескольких физически оправданных и, в ряде случаев экспериментально подтверждаемых, предположений.

Возможными механизмами воздействия атмосферных процессов на возмущения ионосферной плазмы могут быть следующие явления и процессы. Возникновение атмосферной турбулентности (вихря) может сопровождаться генерацией волновых акустических структур, которые распространяются на ионосферные высоты. С другой стороны, турбулентные движения приводят к увлечению заряженных частиц движениями нейтральной компоненты ионосферы и к локальной генерации электрических токов и возмущений плотности плазмы. Возбуждаемая токовая система включает продольные токи, которые переносят возмущение в верхнюю ионосферу.

В работе с помощью созданных оригинальных методов рассмотрены экспериментальные проявления атмосферно-ионосферного взаимодействия, выявленного во время действия 19 крупнейших тропических циклонов и тайфунов (6 достигли 5-ой категории по шкале Саффира- Симпсона и 13 - 4-ой) в 2014г. по плазменным измерениям на спутниках SWARM в спокойных гео-гелиомагнитных условиях.

В периоды максимального развития циклонов большой мощности в экспериментальных данных об электронной концентрации на высотах 450 - 500 км наблюдаются различные проявления атмосферной активности, что свидетельствует о действиях различных механизмов передачи возмущения в ионосферу. Так, в ряде случаев, в полосе частот 10...200 сек нами зарегистрированы колебания электронной концентрации с локализацией и масштабами, характерными для АГВ. Размер области, которую охватывают возмущения, может достигать до 2-3 тысяч км, причем эта область в ионосфере превосходит область шторма в атмосфере. Относительная величина возмущения достигает до 10% в выбранной полосе частот и пропорциональна силе ТЦ. В то же время, в ряде случаев методики выделяют области, топологически связанные с глазом ТЦ, что может быть связано с полевыми механизмами передачи возмущения. В условиях вечерней и ночной ионосферы в ряде случаев наблюдались квази волноподобные возмущения, захватывающие всю область действия ТЦ и не локализованные на периферии области возмущения, как в случае АГВ. Указанные возмущения могут проявляться в вариациях магнитного поля или в виде электростатических шумов, часто регистрируемых бортовой аппаратурой современных ИСЗ.

Полученные нами результаты можно рассматривать как иллюстрацию сложной системы передачи возмущений разных масштабов из нижней атмосферы на ионосферные высоты, строго говоря, оставляя за скобками вопрос об эффективности рассмотренных механизмов в различных "местных" условиях.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИКИ РАН и МГУ, при частичной поддержке грантами РФФИ 18-05-00108 (ПВА) и 19-05-00941 (ЗВИ).

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В F₂-ОБЛАСТИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ЕЁ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ

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

1) ГЦ РАН, г. Москва, СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, r.lukianova@gcras.ru

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

Представлены результаты наблюдений плазменных и магнитных возмущений, индуцированных в F-области среднеширотной ионосферы мощной высокочастотной радиоволновой O-поляризации стенда СУРА, с использованием преимуществ конфигурации и оснащения низкоорбитальной 3-аппаратной группировки спутников SWARM с высотой орбиты ~450 км. Эксперименты были основаны на координированной работе нагревного стенда во время пролетов спутников над возмущенной областью. Модификация ионосферы осуществлялась в поздние вечерние и предполуночные часы в спокойных геомагнитных условиях, когда частота волны накачки O-поляризации находилась в пределах 4.3 – 4.8 МГц при эффективной мощности её излучения 20 – 100 МВт. Получено, что на этих высотах наблюдаются вариации температуры и плотности плазмы в возмущенной магнитной силовой трубке, но ещё не обнаруживаются дакты с увеличенной плотностью плазмы, которые регистрировались на высотах ~ 660 км с помощью ИСЗ DEMETER.

С помощью высокоточных магнитометров ИСЗ SWARM были зарегистрированы продольные токи (ПТ), которые индуцируются в возмущенной ионосфере. В частности, сеансы нагрева проводились, когда над стендом проходили траектории двух спутников, летящими параллельно друг другу на расстоянии ~1° долготы, при этом только один из них пересекал нагретое пятно. Этот спутник наблюдал сильное локальное повышение температуры электронов, сопровождающееся понижением электронной плотности и появлением системы ПТ интенсивностью ~0.05 $\mu\text{A}/\text{m}^2$, направленных в центре пятна из ионосферы и на флангах - в ионосферу. Конфигурация ПТ указывает на то, что индуцированные ПТ связаны с униполярной термодиффузией, которая сопровождается возбуждением вихревых электрических токов в ионосфере, как это было предсказано в лабораторном эксперименте по моделированию параметров F-слоя при локальном нагреве электронов (Костров и др., 2007)).

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № [17-05-00475](#).

РЕЗОНАНСНОЕ УНЧ-ПОГЛОЩЕНИЕ ПЕРЕД МАГНИТНОЙ БУРЕЙ

Бадин В.И.

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

Высокоширотные доплеровские ионосферные наблюдения, осуществляемые радаром когерентного рассеяния, позволяют определять скорость поперечного дрейфа электронов и фиксировать колебания этой скорости в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне. Вычисление спектральной плотности мощности (СПМ) таких данных посредством дискретного преобразования Фурье обнаруживает сильное ступенчатое падение СПМ на частотах порядка 5 мГц. Такие падения СПМ интерпретируются как резонансное поглощение дрейфовых колебаний посредством возбуждения стоячих альфвеновских волн резонанса магнитных силовых линий. Собственные колебания магнитных силовых линий формируют континуум резонансных частот. По этой причине невозможно наблюдать индивидуальные линии поглощения, но хорошо выраженное падение СПМ позволяет определять нижнюю частотную границу резонансного континуума, т.е. минимальную частоту резонансного УНЧ-поглощения. Собственная частота магнитных силовых линий определяется напряженностью геомагнитного поля вдоль силовой линии, плотностью плазмы в магнитосфере и длиной резонансной силовой линии между сопряженными ионосферами. Минимальная резонансная частота соответствует наиболее длинным магнитным силовым линиям, примыкающим к магнитопаузе на дневной стороне магнитосферы.

Резонансное УНЧ-поглощение (РУНЧП), наблюдаемое радаром в области авроральной электроструи, позволяет проводить мониторинг минимальной частоты РУНЧП в периоды достаточной активности электроструи, которые определяются по авроральным геофизическим индексам. В свою очередь, мониторинг минимальной частоты РУНЧП позволяет оценивать изменчивость внешней магнитосферы в зависимости от параметров солнечного ветра, солнечной и магнитной активности. Изучение внешней магнитосферы при различных значениях гелиогеофизических параметров позволяет судить о тех физических процессах в околоземном космическом пространстве, которые играют важную роль в солнечно-земных связях и могут определять характер геомагнитной активности.

В данной работе осуществлен мониторинг минимальной частоты РУНЧП в период, предшествовавший сильной магнитной буре 29 октября 2003 г. Оказалось, что в течение длительного периода сравнительно спокойных условий, предшествовавших буре, минимальная частота РУНЧП лишь несущественно изменялась около значения 5 мГц. Такой результат хорошо согласуется со многими экспериментальными и теоретическими оценками этой величины. Однако, в течение 2–3 дней непосредственно перед бурей минимальная частота РУНЧП достаточно быстро понизилась до значений около 2 мГц и ниже, после чего и наблюдалось внезапное начало сильной магнитной бури. Существенное понижение минимальной частоты РУНЧП соответствовало периоду устойчивых отрицательных значений V_y и V_z -составляющих межпланетного магнитного поля. Возможное объяснение этого эффекта состоит в захвате геомагнитным полем энергичных ионов магнитослоя после прохождения солнечным ветром отошедшей ударной волны. В этом случае снижение напряженности геомагнитного поля за счет диамагнетизма горячей плазмы и рост плотности плазмы внутри магнитосферы могли бы обеспечить значительное понижение минимальной частоты РУНЧП. Полученный результат может представлять интерес для прогнозирования сильных магнитных бурь.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 17-05-00427) и Программой 28 Президиума РАН.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ РАДИОСИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ИОНОСФЕРЫ

Афанасьев Н.Т., Чудаев С.О.

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

Аналитические расчеты флуктуаций доплеровского сдвига частоты радиосигнала, отраженного от ионосферы, ранее были выполнены для простых моделей высотного профиля электронной концентрации, в частности для плоской параболической модели [1]. Поэтому необходим аппарат математического моделирования статистики сдвига частоты в ионосфере с более общей зависимостью функции средней электронной концентрации от координат. Для плоского случая в работах [2,3] нами были проведены численно-аналитические расчеты флуктуаций доплеровских частот в случайно-неоднородной ионосфере, в среднем горизонтально неоднородной. Приближение плоской среды позволяет вводить декартову систему координат и значительно упростить расчеты. Между тем имеется ряд прикладных задач, когда сферичность имеет принципиальное значение при оценке флуктуаций доплеровских частот. Например, при ионосферном распространении декаметровых радиоволн на значительные расстояния необходимо учитывать сферичность Земли и сферическую асимметрию окружающей случайно-неоднородной плазмы. Для этих условий в работе развит аппарат математического моделирования влияния дрейфа регулярных и хаотических неоднородностей электронной концентрации на доплеровский сдвиг частоты радиосигнала, отраженного от ионосферы. Сделан вывод приближенных аналитических формул для расчета среднего и среднеквадратичного сдвига частоты радиосигнала. Получена система дифференциальных уравнений первого порядка для одновременного расчета статистических доплеровских характеристик и усредненных траекторий, соединяющих приемный и передающий пункты зондирования. Приведены результаты численно-аналитического моделирования статистических моментов доплеровского сдвига частоты на трассах наклонного зондирования. Показана роль сферической асимметрии детерминированной и хаотической составляющих околоземной плазмы при формировании ширины спектральной линии различных мод декаметрового радиосигнала. Полученные для разных геофизических условий характерные значения флуктуаций доплеровского сдвига частоты нижней и верхней моды могут быть использованы для прогнозирования надежности радиосвязи, для точностных измерительных задач в декаметровом диапазоне, а также для увеличения разрешающей способности методов доплеровской фильтрации ионосферных сигналов.

1. Вологдин А.Г., Приходько Л.И., Широков И.А. Статистика доплеровского смещения частоты радиоволн, отраженных от параболического ионосферного слоя // Труды V Всероссийских Армандовских чтений «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред».- Муром, 2012.- С 159-163.
2. Ageeva E.T., Afanasiev N.T., Kim D.Ch. Fast technique for calculating fluctuations of the Doppler signal Frequency shift in a horizontally non-uniform channel // EESJ. 2016, №14, par.3. P.77-84.
3. Афанасьев Н.Т., С.О. Чудаев. Оперативная методика расчета флуктуаций доплеровского сдвига частоты радиосигнала в случайно-неоднородной ионосфере // Тез. научн. конфер. “Физика плазмы в солнечной системе” М.: ИКИ РАН, 2018.

МЕТОД БЫСТРОГО ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ЛУЧЕЙ В ЧАСТИЧНО-ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ОКОЛОПЛАНЕТНОЙ ПЛАЗМЕ

Афанасьев Н.Т., Чудаев С.О.

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

В задачах распространения радиоволн в ионосферах планет земной группы широко используется лучевое приближение [1,2]. При этом основное внимание уделяется вопросам случайной и регулярной рефракции лучей. В результате совместного влияния хаотических и детерминированных неоднородностей околопланетной плазмы направление распространения лучей меняется сложным образом. Хаотическую составляющую плазмы составляют неоднородности различных масштабов и интенсивностей. Наиболее значимыми детерминированными неоднородностями плазмы являются макромасштабные слоистые структуры, представляющие собой регулярные высотные профили электронной концентрации. Под воздействием хаотических и детерминированных неоднородностей околопланетной плазмы возможно рассеяние и полное внутреннее отражение радиоволн, формирование теневых зон, прохождение радиоволн сквозь ионосферу и др. явления [3].

Для расчетов флуктуаций лучей в частично-детерминированной плазме в работе предложен полуаналитический метод, сочетающий асимптотические разложения и численное интегрирование. Результатом асимптотических разложений является приближенное решение стохастической краевой задачи для системы лучевых дифференциальных уравнений, записанной в гамильтоновой форме. Использование корреляционной функции хаотических неоднородностей плазмы позволяет отказаться от метода статистических испытаний и непосредственно рассчитать статистические моменты направления распространения лучей для произвольного аналитического высотного профиля электронной концентрации. Расчет статистических моментов осуществляется путем численного интегрирования расширенной системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, позволяющей одновременно определить средние и среднеквадратичные характеристики направления распространения лучей. Предложенный полуаналитический метод позволяет оперативно рассчитать флуктуации лучей в хаотической плазме с макромасштабными детерминированными неоднородностями. Реализация метода показала его высокую эффективность при оценке частотно-углового режима радиопросвечивания околопланетной плазмы. Приведены примеры расчетов статистических моментов направления распространения лучей на трассах различной протяженности в широком диапазоне частот радиопросвечивания плазмы. Показан рост дисперсии направления прихода лучей в пункт наблюдения вблизи границ теневых зон, образующихся под влиянием макромасштабных неоднородностей.

1. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга, 1998. 432 с
2. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли: Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. - М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2010. 208 с.
3. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн.- М.: ЛЕНАНД, 2009. 496 с.

ВАРИАЦИИ ЧАСТИЧНО ОТРАЖЁННЫХ ОТ D-ОБЛАСТИ РАДИОСИГНАЛОВ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ ОБ АТМОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРАХ

Черняков С.М., Турянский В.А.

ПГИ, г. Мурманск, Россия, sergeich@pgi.ru

Метод частичных отражений, предложенный в начале 1950-х годов Гарднером и Поззи [1], является эффективным инструментом исследования D-области ионосферы. Этот метод позволяет получать информацию об амплитуде обыкновенной и необыкновенной волн, частично отраженных от неоднородностей электронной плотности, и рассчитывать вариации электронной концентрации во времени с частотой зондирования и с выбранным по высоте шагом оцифровки принимаемого сигнала. Таким образом, имеется возможность наблюдения вариаций частично отраженных радиосигналов на выбранной высоте и выделения колебаний среды, вызванных различными источниками как естественного, так и искусственного происхождения.

Теория акустико-гравитационных волн (АГВ) в атмосфере дает удобную возможность описать многие из волнообразных колебаний в атмосфере. Некоторые из них основаны на том, что атмосфера представляет собой сжимаемый газ, который после сжатия и затем прекращения действия сжимающей силы начинает колебаться вблизи своего состояния равновесия. В случае плоско-стратифицированной, изотермической атмосферы и постоянной силы гравитации с высотой существуют две частотные области для атмосферных волн, где они могут распространяться как акустические и гравитационные волны. Эти области описываются двумя резонансными частотами атмосферы: частотой акустического обрезания и частотой Бранта-Вяйсяля, которую определяют как частоту плавучести с которой вертикально смещенный объем будет колебаться в статически постоянной среде. Для D-области ионосферы периоды этих атмосферных резонансов меньше 6 минут.

Установка частичных отражений (69.0 с.ш., 35.7 в.д.) работает в Полярном геофизическом институте с конца 1990-х годов. За время работы накоплена база данных амплитуд частично отраженных обыкновенной и необыкновенной волн и, рассчитанных на их основе, электронной концентрации. Зондирование ионосферы осуществляется раз в секунду от высот 30 км до 150 км. Это позволяет исследовать поведение отраженных амплитуд на разных высотах во времени и, следовательно, получать спектры колебаний на этих высотах.

Получаемый из эксперимента спектр временных вариаций частично отраженной обыкновенной волны на выбранной высоте содержит явно выраженные максимумы. На основе теории АГВ и эмпирической модели состава и температуры атмосферы (NRLMSISE-00) в спектре проводится идентификация периодов колебаний, соответствующие периодам акустического обрезания и Бранта-Вяйсяля. Это дает возможность решить обратную задачу и рассчитать реальную температуру атмосферы на выбранной высоте.

Для того, чтобы вызвать появление в атмосфере атмосферных резонансных колебаний необходимо наличие источника возмущений. В качестве такого источника колебаний в атмосфере выбрано прохождение солнечного терминатора, которое генерирует в атмосфере возмущения различного типа. Нами рассмотрена реакция нижней ионосферы на прохождение солнечного терминатора во время захода Солнца на высоте 75 км для дней, когда трехчасовой планетарный индекс геомагнитной активности К_p был меньше или равен 1. Показано, что вычисленная температура имеет сезонный ход. Значения температур, полученные на основе данной методики, согласуются с данными других исследователей. Таким образом, использование метода частичных отражений позволяет получать высотный профиль температуры в нижней ионосфере.

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ЗАМАГНИЧЕННОМ ФОНЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕКТРОСКОПИИ И ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

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

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, chibranov_25@mail.ru

Лабораторное моделирование позволяет изучать различные космофизические процессы и явления (подробное изучение которых сложно осуществить в естественной среде) в пределах экспериментальной установки, затрачивая при этом гораздо меньшее количество ресурсов по сравнению с проведением экспериментов за пределами Земли.

Цель настоящей работы – исследование потока лазерной плазмы, разлетающейся в замагниченный фон, применяя спектральную и магнитозондовую диагностику.

Объект исследования создавался на экспериментальном стенде КИ-1:

Излучение от CO₂-лазера ($E_k \sim 200$ Дж) направляется на мишень в крупногабаритной ($\varnothing 120$ см*5м), высоковакуумной ($2 \cdot 10^{-6}$ Торр) камере. В результате абляции на поверхности мишени образуется горячая лазерная плазма, которая адиабатически расширяется и распространяется перпендикулярно мишени в вакуум, фоновую плазму, созданную тета-пинчем или однородное магнитное поле, созданное катушками. Необходимые для настоящей работы данные регистрировались монохроматором в паре с ФЭУ и магнитными зондами М1 и М2 (Рис.1Б).

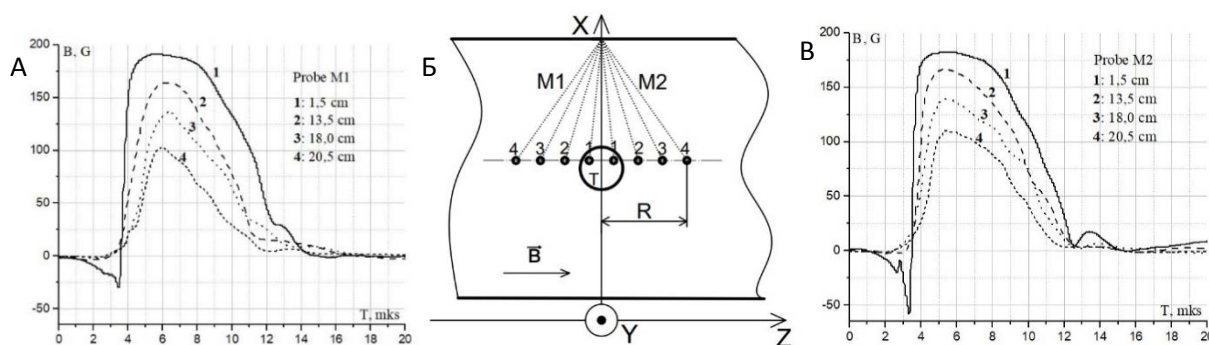


Рис.1. Сигналы с магнитного зонда М1 (А) и магнитного зонда М2 (В) для различных расстояний R между зондами (Б) по оси Z (вдоль камеры). Измерения проводились во внешнем магнитном поле ($B_0 = +300$ Гс) в вакууме.

По полученным с магнитных зондов данным видно, что размер плазменного облака по оси Z составил примерно 41 см (20,5 см от нормали мишени). Учитывая расстояние от мишени до точки исследования (~ 40 см), угол разлета плазмы составил 28° относительно нормали мишени.

Также, с помощью спектральной диагностики были получены данные о скорости разлета отдельных компонент лазерной плазмы (ионы C^{2+} и H^+) в фоновую плазму и вакуум. Скорость распространения лазерной плазмы в вакуум составила ≈ 100 км/с, что примерно в 1.5 раза быстрее скорости ее распространения в фоновую плазму и магнитное поле (≈ 70 км/с).

Настоящая работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-32-00029 и № 18-42-543019.

Итоги работы позволяют расширить область знаний о поведении плазмы в различных средах и послужат хорошим информационным подспорьем для точного теоретического и численного моделирования нестационарных космофизических процессов на установке КИ-1, таких как: вспышки Сверхновых звезд, солнечный ветер и др.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

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

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

Одним из важных параметров лазерной плазмы является скорость распространения различных ионных составляющих. Одним из методов измерения скорости является доплеровское уширение и сдвиг спектральных линий. В частности, это позволяет измерить поперечную составляющую скорости и угол распространения плазменного факела относительно нормали мишени. Применяемая (C_2H_4) мишень при абляции дает ионы водорода и углерода разного заряда, которые имеют разный конус расширения. Измерение этого эффекта возможно только спектральными методами с использованием ПЗС-линейки для регистрации профиля спектральной линии.

На установке КИ-1 моделировались процессы распространения лазерной плазмы в магнитном поле порядка $B = 300$ Гс и без него. Плазменное излучение фокусировалось системой зеркал и линз на входной щели монохроматора. После чего дифрагированное изображение фокусировалось на ПЗС-линейке, а изображение отправлялось на компьютер. Проанализировав зарегистрированные спектральные линии, было рассчитано уширение отдельных спектральных линий по формуле Доплера, а также определили скорости распространения ионов от нормали мишени из формулы $\Delta\lambda/\lambda = \Delta V/c$

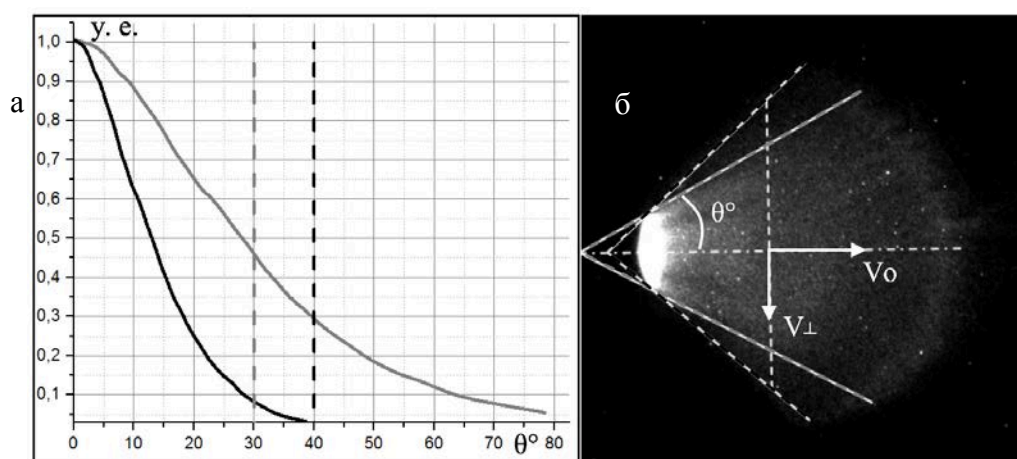


Рис.1. а) Профили скоростей к углу распространения относительно нормали мишени, выведенные из профиля линии водорода $H\beta$ (656,3 нм). Серая сплошная линия показывает профиль, предполагая простейшую модель $V_{\perp} = \text{const}$, а черная линия – $V_{\perp} / V_0 \sim \cos(\theta)$, где V_0 - скорость вдоль нормали мишени. Черная вертикальная пунктирная линия указывает наблюдаемую границу плазменного факела, показанного на изображении, серая пунктирная линия – граница остаточного гало. б) Изображение плазменного факела, получено с помощью фотокамеры (PCO AG hsfcp).

Таким образом, собранные данные позволяют лучше понимать динамику распространения лазерной плазмы в рамках проводимых экспериментов и на стенде КИ-1 в частности.

Настоящая работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-32-00029 и № 18-42-543019.

ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПО ДАННЫМ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ ДНЕВНОЙ ИОНОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ

Гаврик А.Л., Копнина Т.Ф., Бондаренко М.И.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, alg248@hotmail.com

Выполнены анализ ошибок определения концентрации электронов в дневной ионосфере Венеры по результатам радиопросвечивания и оценка перспективы получения более точной информации о свойствах ее ионосферы. Исследование основано на данных спутников Венера-9,-10,-15,-16 и моделировании эксперимента. Одна из главных причин ограничения точности радиозатменных данных – инструментальный шум, величина которого зависит от характеристик радиосистемы, а при высокой стабильности аппаратуры от энергетического потенциала радиолинии. Основным источником погрешностей метода радиозатмений могут быть вариации концентрации межпланетной плазмы и земной ионосферы на трассе распространения радиоволн между КА и наземным пунктом радиосвязи, ответственные за флуктуации амплитуды и частоты радиоволн. Методические погрешности интегрирования экспериментальных данных, содержащих шум, и возможная асимметрия зондируемой среды также могут снизить качество сведений об ионосфере, в частности, вблизи нижней границы дневной ионосферы Венеры, что ограничит возможность обнаружения и исследования процессов, ответственных за динамические изменения в системе атмосфера-ионосфера.

По результатам радиозатменных экспериментов в дневной ионосфере Венеры выделены области νF_2 , νF_1 , νE , νD , такая слоистость обусловлена преобладающими физическими процессами, которые аналогичны процессам в слоях F2, F1, E, D земной ионосферы. Погрешность определения электронной концентрации в разных слоях ионосферы разная, т.к. методика расчета электронной концентрации основана на интегрировании данных радиопросвечивания, искаженных широкополосным шумом. Показано, что при слабо возмущенной плазме на трассе связи относительная погрешность определения концентрации электронов в слоях νF_2 и νF_1 может составлять 1%-2%, в слое νE она возрастает до 4%-6%, а в слое νD погрешность может быть более 100% при использовании традиционной методики определения электронной концентрации. При сильно возмущенной плазме на трассе связи или при одночастотном радиопросвечивании погрешность определения электронной концентрации может возрасти в несколько раз. Асимметрия венерианской ионосферы может внести дополнительные погрешности в определение электронной концентрации, сравнимые с влиянием крупномасштабных возмущений межпланетной плазмы.

Установлено, что в области νD наблюдается максимальное влияние факторов, ухудшающих достоверность сведений об электронной концентрации в ионосфере, именно по этой причине отсутствовали надежные сведения о существовании области νD до тех пор, пока не был разработан новый метод анализа радиозатменных данных. Инвариант радиозатменного эксперимента, положенный в основу разработанного метода, предоставил возможность анализировать свойства ионосферы по функциональной связи вариаций мощности и частоты зондирующих сигналов, не используя интегральных преобразований, применяемых при решении обратной задачи, что увеличило чувствительность метода радиопросвечивания к малым вариациям показателя преломления зондируемой среды. Применение метода позволило обнаружить вблизи нижней границы дневной ионосферы Венеры периодические возмущения электронной концентрации, уровень которых превышал случайные вариации, обусловленные шумом. Колебания электронной концентрации с характерным масштабом 5-10 км по вертикали наблюдали в интервале высот от 85 до 130 км, что позволило доказать существование области νD на освещенной стороне Венеры.

Работа выполнена при частичной поддержке программы № 28 Президиума РАН.

**ВЫСОТНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ДОЛГОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ "ПУЗЫРЕЙ": ВЛИЯНИЕ ЗОНАЛЬНОГО
ПЛАЗМЕННОГО ДРЕЙФА**

Л.Н. Сидорова, С.В. Филиппов

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

Экваториальные плазменные "пузыри" (EPB), формирующиеся на высотах основания F -области, при подъеме на большие высоты испытывают влияние зонального плазменного дрейфа. Под влиянием дрейфа они перемещаются вдоль долготы на восток. Для исследования степени влияния зонального дрейфа на долготные распределения EPB, выявляемые в разных высотных регионах, были использованы данные спутников ISS-b и ROCSAT-1, летавших на высотах ~ 1100 и ~ 600 км, соответственно. Выявлено, что степень долготного сдвига EPB зависит от высоты их подъема или длины магнитной силовой трубки, вдоль которой они вытянуты в момент регистрации. Чем меньше высота подъема EPB, тем сильнее плазменный "пузырь" сдвигается вдоль долготы. Полученный результат находится в хорошем согласии с выводами Kil et al. (J. Geophys. Res., 2009) о дифференциальном (меняющемся с высотой) влиянии зонального плазменного дрейфа. Благодаря такому влиянию поднимающийся вверх плазменный "пузырь" может формировать трехмерную структуру, визуально напоминающую "раковину".

ВОЗМУЩЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ПЕРИОДЫ ДО И ПОСЛЕ ГЛАВНЫХ УДАРОВ МОЩНЫХ ЧИЛИЙСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Ишкова Л.М., Ружин Ю.Я., Бершадская И.Н.

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

Представлены результаты анализа крупномасштабных пространственно-временных возмущений полного электронного содержания (ПЭС) в протяженных областях южно-американской ионосферы ($\lambda=45^{\circ}\div 105^{\circ}\text{W}$, $\varphi=0^{\circ}\div 60^{\circ}\text{S}$) в периоды до и после главных ударов мощных чилийских землетрясений 27.02.2010 г. (06:34UTC, 36.1°S , 72.9°W , $M=8.8$) и 01.04.2014 г. (23:46UTC, 19.6°S , 70.7°W , $M=8.2$).

Проведены исследования суточных вариаций ПЭС в периоды 18-27.02, 28.02-09.03 2010 г. и 25.03-01.04, 02-09.04 2014 г., характеризовавшихся высокой форшоковой и афтершоковой активностью, по отношению к соответствующим рассмотренным периодам медианным уровням ПЭС (величины $\delta\text{ПЭС},\%$, $\Delta t=2\text{ч}$, $\Delta\lambda=15^{\circ}$, $\Delta\varphi=5^{\circ}$).

Показано, что в спокойных геомагнитных условиях в протяженных областях южно-американской ионосферы в рассмотренные периоды имели место аномальные положительные и отрицательные возмущения ПЭС с величинами $|\delta\text{ПЭС}|\geq 30\%$ как до, так и после главных ударов данных чилийских землетрясений. Приведены оценки характеристик возмущений полного электронного содержания ионосферы: величин $\delta\text{ПЭС},\%$, пространственных масштабов областей ионосферы с аномальными возмущениями ПЭС, длительностей возмущений в суточном ходе ПЭС.

ИЗМЕРЕНИЯ ДРЕЙФОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ОБЛАСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА

В.Л. Халипов (1), А.Е. Степанов (2), С.Е. Кобякова (2)

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

(2) ИКФИА СО РАН, пр. Ленина 31, г. Якутск, a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru

По данным доплеровских измерений на субавроральной ионосферной станции Якутск впервые обнаружены новые, ранее не известные динамические явления во время развития поляризационного джета. Проведенные исследования горизонтальных и вертикальных скоростей дрейфов плазмы во время развития поляризационного джета выявило, что в периоды наблюдения поляризационного джета скорости горизонтальных и вертикальных дрейфов существенно выше, чем их фоновые движения. Скорости горизонтального дрейфа плазмы составляют, в среднем, примерно 300-600 м/с (есть события со скоростями 900-1000 м/с). Скорости вертикальной составляющей дрейфа, также в среднем, составляют 30-50 м/с (есть события со скоростями 100-150 м/с). По результатам анализа наземных ионосферных данных установлено, что все события, в которых наблюдается развитие поляризационного джета над Якутском можно разделить на 4 группы. В первой группе максимальные значения вертикальных скоростей в полосе поляризационного джета наблюдаются одновременно с максимальными горизонтальными скоростями. В двух группах пик вертикальной скорости наблюдается примерно за час до или после наблюдения максимальной горизонтальной скорости, а в последней группе на временной оси вертикальные скорости имеют равнозначные пики по обе стороны от пиковых значений горизонтальных скоростей. Обсуждаются возможные причины возникновения различных вертикальных потоков плазмы.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР ИКИ РАН при частичной поддержке Программы № 28 ПРАН «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

АНОМАЛЬНАЯ ИОНИЗАЦИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В АКТИВНОМ ИОНОСФЕРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Ковалев А.Т., Ковалева И.Х.

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

При инъекции высокоскоростной (40 км/с) алюминиевой плазменной струи в области F ионосферы в эксперименте «North Star» [1,2] наблюдалась аномально высокая степень ионизации струи при выпуске ее в предварительно созданное воздушное облако по сравнению с выпуском в фоновую среду. «Закалка ионизации» при быстром расширении в разреженную среду отчасти объясняет ионизацию струи при выпуске в фоновую среду. Степень ионизации при выпуске в искусственное воздушное облако можно объяснить только взаимодействием с этим облаком, однако, оценки по механизму простой ударной ионизации при столкновении нейтральных атомов алюминия с нейтральной окружающей средой не дают наблюдаемых величин степени ионизации.

Поэтому необходим поиск новых механизмов дополнительной ионизации плазмы. Наличие малых примесей, малых добавок воды водных кластеров значительно снижает порог ионизации в искусственном воздушном облаке. Увеличенное сечение поглощения ультрафиолетового излучения струи за счет фотоионизации и фотодиссоциации формирует область повышенной ионизации возбуждения воды, водных кластеров, компонент O^+ , H^+ в окрестности точки инъекции, перед фронтом струи. На фронте струи формируются волны нейтральной и заряженной компонент плазмы, увеличивая эффективную относительную скорость частиц струи и фоновой плазмы [3].

В этих условиях основным механизмом поддержания высокой степени ионизации струи может стать обмен зарядом между нейтральным алюминием струи и заряженными частицами фона [4]. Для атомов с большими значениями разности потенциалов ионизации сечение обмена электроном между основными состояниями – порядка 10^{-16} см^2 и менее в достаточно узком диапазоне относительных скоростей вблизи 10^3 км/с . Однако, при захвате электрона, например, на возбужденный 3s уровень O^+ , или первый возбужденный уровень H^+ (свободный или в составе водного кластера), скорость, при которой сечение максимально, уменьшается а сечение возрастает. При захвате электрона на возбужденный уровень воды с энергией связи 7.49 эВ сечение близко к 10^{-15} см^2 . Резко возрастает сечение перезарядки и с возбужденного уровня алюминия. В частности, при захвате электрона с возбужденного уровня (3.13 эВ) на возбужденный уровень водорода перезарядка становится почти резонансной и сечение возрастает до 10^{-14} см^2 и более.

В работе показано, что при выпуске струи в искусственное воздушное облако в условиях эксперимента «North Star» предлагаемый механизм может объяснить аномальный уровень ионизации. Основными каналами аномальной ионизации струи являются перезарядка возбужденного алюминия и обмен зарядом с ионами кислорода, водорода воды и водных кластеров.

1. Erlandson R. E., Meng C.I., Swaminathan P.K., et al, // Journal of Spacecraft and Rockets 2004. V. 41(4). P. 483-489.
 2. Delamere P. A., H. C. Stenbaek-Nielsen, R. F. Pfaff et al // J. Spacecraft Rockets 2004.V. 41 (4) P. 503-508.
 3. Ковалева И.Х. // доклад на данной конференции.
 4. Ковалев А.Т., Ковалева И.Х. // Динамические процессы в геосферах. Вып. 9: сб. научных трудов ИДГ РАН. 2017. С. 116-123.
- Ковалев А.Т., Ковалева И.Х.

ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНИЗОВАННОЙ И НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТ ПЛАЗМЫ НА ДИНАМИКУ ВОЗМУЩЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ПЛАЗМЕННЫХ ОБЛАКОВ АКТИВНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

Ковалева И.Х.

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

Взаимодействие нейтральной и заряженной компонент ионосферной плазмы может быть источником возбуждения естественных волновых возмущений и оказать существенное влияние на эволюцию искусственно создаваемых в ионосфере плазменных облаков. В качестве первого примера такого взаимодействия рассмотрено возбуждение акустического импульса электромагнитным сигналом от падающего метеороида в оптически возбуждённой воздушной среде стратосферы. Вторым примером такого взаимодействия является существенное изменение эволюции плазменной струи в ионосфере при инъекции её в предварительно выпущенное воздушное облако. Отличие в разлёте плазмы в случае присутствия воздушного облака (увеличение на порядки ионизации, образование магнитной каверны, длительная регистрация ионных волн [1-3]) требует интерпретации этого феномена. Так как ни значительной ионизацией нейтрального облака при поглощении жёсткого ультрафиолетового излучения, ни дополнительной ионизацией при столкновениях с нейтралами ускоренных ионов алюминия объяснить эти различия в полной мере не удаётся, была выдвинута гипотеза об участии нейтральной компоненты в формировании плазменной струи или облака. Роль накопления энергии в колебательном возбуждении нейтральных компонент воздуха, и формировании в этом случае «акустически активной» среды изучалась в ряде работ (например, [4,5]). В возбуждённой среде возможен режим распространения акустического возмущения, усиливаемого энергией релаксации колебательного возбуждения зарядово-нейтральных молекул. При наличии электромагнитного сигнала взаимодействие заряженной и нейтральной компонент плазмы приводит к возбуждению колебаний на циклотронной частоте ионов, подпитываемых энергией «акустически активной» среды. По предложенной модели акустическая и ионно-циклотронная волны в присутствии низкочастотного электромагнитного сигнала взаимодействуют, обмениваясь энергией, при условии выполнения трёхволнового резонанса, когда совпадают волновые вектора и частоты акустической и ионно-циклотронной волн $k_{ac} = k_{ic}$ и $\omega_{ak} = \omega_{ic}$, а электромагнитный сигнал имеет удвоенную частоту. Для исследования данного эффекта была построена аналитическая модель трёхволнового взаимодействия и проведено численное моделирование роста волнового возмущения на циклотронной частоте, получены необходимые условия для возбуждения волны по данному механизму (концентрации ионов, плотности нейтральных компонент, частоты возбуждения, амплитуды электромагнитного сигнала и т.д.).

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

1. Erlandson R. E., Meng C.I., Swaminathan P.K., et al.//Journal of Spacecraft and Rockets, 2004, V.41 (4), pp.483-489.
2. Gavrilov, B. G., I. M. Podgorny, D. B. Sobyenin, J. I. Zetzer, et.al.// J. Spacecraft Rockets, 2004. V.41 (4). pp. 490-495.
3. Linch K. A., Torbert R.B., Chutter M. et al., Journal of Spacecraft and Rockets, 2004. V. 41(4), pp.496–502.
4. Григорьев Ю.Н., Ершов И.В., Ершова Е.Е. //ПМТФ 2004. Т.45. №3. С.15-23.
5. Zavershinskii I., Makaryan V., Molevich N.//Proc. Mtgs. Acoust. 2013. V.19. p.045034

ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ОБЛАКА ПРИ ЕГО РАЗЛЁТЕ В ИОНОСФЕРЕ

^{1,2}Лосева Т.В., ¹Косарев И.Б., ¹Зецер Ю.И., ^{1,2}Ляхов А.Н., ²Черменин А.В.

¹*Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия, losseva@idg.chph.ras.ru*

²*Центр фундаментальных и прикладных исследований ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия*

Во второй половине прошлого столетия было проведено большое количество геофизических экспериментов с выбросом в ионосферу плазменных сгустков и струй. Фундаментальные проблемы физики плазмы, решавшиеся в ходе этих экспериментов, включали исследование процессов взаимодействия плотной горячей плазмы с геомагнитным полем, возникновения крупномасштабной плазменной турбулентности, влияния процессов переноса излучения на динамику плазменного образования. Созданные численные магнитогидродинамические (МГД) модели позволили получить качественное согласие с экспериментальными данными на начальной стадии движения плазмы в геомагнитном поле. В то же время, до настоящего времени не выполнены расчеты, корректно описывающие процессы остановки плазменного образования и его распада. Вопрос об относительной роли МГД - и радиационно-газодинамических (РГД) процессов, влиянии на них неравновесности остаются предметом дискуссии.

Верификация физической модели расширения металлической плазмы возможна только по данным оптической регистрации, выполнявшейся наземной, спутниковой и ракетной аппаратурой в диапазоне длин волн от УФ до дальнего ИК с высоким временным и спектральным разрешением. Решение такой задачи требует учета процессов переноса излучения. На ранней стадии динамики разлета металлической плазмы в разреженный воздух применима РГД модель разлета паров металла.

Численное моделирование динамики разлета плотного сгустка алюминиевой плазмы на высоте F-слоя ионосферы выполнено с помощью численного решения сферически-симметричных РГД уравнений для различных начальных условий [1, 2] в приближении локального термодинамического равновесия и в диффузионном приближении для самосогласованного расчета переноса излучения. Характеристики излучения рассчитывались независимым интегрированием уравнений переноса излучения вдоль совокупности большого количества лучей, проходящих в точку наблюдения через расчетную область.

Получены временные зависимости газодинамических параметров плазмы и параметров излучения облака в широком диапазоне длин волн (плотности потоков излучения в различных точках наблюдения, диаграммы направленности этого излучения), а также рассчитана ионизация окружающей ионосферы под действием испущенного излучения. Разработанная модель позволила качественно объяснить оптические наблюдения кольцевых плазменных образований в экспериментах 1958 и 1962 годов.

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

1. Лосева Т.В., Косарев И.Б., Зецер Ю.И., Ляхов А.Н., Черменин А.В. Свечение высокотемпературного алюминиевого облака на начальной стадии его разлета в ионосфере // Динамические процессы в геосферах. Выпуск 10. Сборник научных трудов ИДГ РАН М.: ГЕОС, 2018. С. 193-200.
2. Косарев И.Б. Радиационные свойства алюминиевой плазмы // Динамические процессы в геосферах. Выпуск 9. Сборник научных трудов ИДГ РАН М.: ГЕОС, 2017. С. 110-116.

**ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ ТОКИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ
СЕНТЯБРЯ 2017 г.**

Лукьянова Р.Ю.^{1,2}

¹ ГЦ РАН, г. Москва, r.lukianova@gcras.ru

² ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Наблюдения спутников SWARM используются для характеристики продольных токов (ПТ) во время наиболее сильной магнитной бури 24-го солнечного цикла в сентябре 2017 года. Траектории спутников пересекали полярные области обоих полушарий в послеполуночном, предполуденном, утреннем и вечернем секторах. В ходе развития бури сопровождавшейся двумя активациями суббури, наблюдалось значительное вариации и усиление ПТ, а также смещение их границы к экватору. Экваториальные границы ПТ в основном следуют динамике кольцевого тока. Минимальная широта границ ПТ опускается до 50° магнитной широты, далее происходит насыщение. Плотности ПТ очень изменчивы и резко возрастают во время суббури. На пике суббури средняя плотность FАC достигает 3 $\mu\text{A}/\text{m}^2$, в то время как уровень в невозмущенном состоянии $\sim 0,1 \mu\text{A}/\text{m}^2$. Глобальная асимметрия утро-вечер проявляется в превалировании ПТ R2 на вечерней стороне в обоих полушариях.

Наблюдения SWARM показывают, что значительная часть стационарных крупномасштабных ПТ (R1 и R2) состоит из мелкомасштабных нитевидных структур. В полуденном секторе преобладают биполярные мелкомасштабные структуры (ПТ противоположных полярностей, смежные друг с другом, ширина каждого $\sim 7,5$ км.), в то время как в после-полуночном секторе – униполярные структуры, т.е. втекающие и вытекающие из ионосферы мелкомасштабные ПТ разделены по широте. В то же время, пара наиболее интенсивных ПТ ($\sim 80 \mu\text{A}/\text{m}^2$) обнаруживаются именно после полуночи непосредственно перед началом суббури. Одновременные магнитные и плазменные возмущения указывают на то, что эта структура является токовой системой мезомасштабной авроральной дуги.

Работа выполнена в рамках государственного задания при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № [17-05-00475](#).

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ V0 И V1 В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ЗОНЕ

Мальцева О.А., Никитенко Т.В.

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

Параметры V0 и V1 определяют форму N(h)-профиля ионосферы и рассчитываются в любой модели, однако есть расхождение с экспериментальными значениями. Большинство публикаций посвящены изучению V0, V1 и сравнению с моделями в средних, низких и экваториальных широтах. В настоящей работе такое изучение проведено по данным высокоширотной станции Норильск (69.4°N, 88.1°E), которые брались из базы DIDbase и включают период с 2003 по 2012. Результаты разбиты на 2 части: описание климатологических особенностей и вариации во время возмущений. Проведено сравнение с моделью IRI. В сезонном ходе экспериментальные значения V0 выше летом и в годы высокой активности. Модель IRI правильно воспроизводит тенденцию сезонного хода, в том числе зависимость от солнечной активности, но диапазон значений меньше, летние значения ниже экспериментальных, а ночные выше. Экспериментальные значения V1 имеют минимум летом, максимум зимой, разброс от 1.3 до 3.0. Есть некоторая тенденция обратной зависимости от солнечной активности. Для IRI значения V1 имеют сезонную зависимость, но нет зависимости от солнечной активности. В суточном ходе вариации V0 и V1 присущи только летним месяцам с четкой зависимостью от солнечной активности, в зимнее время V0 и V1 практически постоянны. Для месяцев равноденствия значения V0 и V1 совпадают и лежат между минимумом и максимумом. Для модели IRI значения V0 постоянны, находятся на уровне равноденственных экспериментальных значений, проявляют некоторую зависимость от солнечной активности. Значения V1 постоянны только в летнее время, в остальные месяцы есть четкая тенденция сезонных вариаций с максимумами в полночь, но значения завышены. Если сравнивать относительные отклонения $\sigma, \%$, то наибольшими они являются для параметра V0, причем зимой значения могут составлять до 100%, летние лежат в пределах 10-40% с общей тенденцией увеличения с уменьшением солнечной активности. Для параметра V1 зимние значения меньше (15-40%), летние имеют больший разброс (8-50%) без определенной зависимости от солнечной активности. Для foF2 были получены величины 1-10% в летнее время, 15-50% в зимнее время. Для hmF2 при высокой активности $\sigma < 10\%$, при низкой активности – 10-20%. Это свидетельствует о том, что средние значения не являются надёжными, и создает трудности при разработке модели V0, V1, что видно по результатам для модели IRI. Периоды возмущений рассмотрены для 2003, 2009 и 2012 годов. Знак возмущения контролировался по TЕС. Всего получилось 64 случая, из них в 55 случаях удалось отождествить вариации параметров. Случаи положительных и отрицательных отклонений TЕС от медиан разделились почти пополам. В группе отрицательных отклонений TЕС наибольшую вероятность имеют случаи увеличения V0 и уменьшения V1, меньше случаев увеличения V0 и близости V1 к медиане. Для положительных отклонений TЕС больше случаев увеличения V0 и уменьшения V1, вторая подгруппа включает уменьшение V0 и увеличение V1. Т.о, в большинстве случаев V0 увеличивается, а для изменений V1 существует неопределенность. Не обнаружено зависимости результатов от уровня возмущений. Работа выполнена в рамках гранта БЧН3.9696.2017/8.9 Минобрнауки РФ.

**GEOMAGNETIC PULSATIONS IN THE PC5/PI3 FREQUENCY RANGE AND
BACKGROUND FLUCTUATIONS OF CRITICAL FREQUENCIES**

Yagova N. V., Kozlovsky A., Kozyreva O. V.

Parameters of background variations of FoF2 critical frequency in the 1–4mHz frequency range are studied. For that, a technique of automatic detection of critical frequency from the ionograms is developed. The background variations of FoF2 frequency was compared with the Pc5/Pi3 geomagnetic pulsations in on the ground and the magnetosphere. It was found, that Pc5/Pi3 fluctuations of Fof2 are predominantly registered in the afternoon MLT sector under weak and moderate magnetic disturbances. Background variations of FoF2 are in the majority of cases decoupled from the Pc5/Pi3 on the ground. The fraction of coherent geomagnetic and Fof2 pulsations is higher for the geomagnetic pulsations registered in the magnetosphere, than on the ground. Case studies showed coherent pulsations simultaneously registered in the magnetic field and particle flux at THEMIS satellite located in the night magnetosphere and FoF2 in Sodankyla. Meanwhile, we have found no correspondence in geomagnetic pulsations at Sodankyla. This effect is probably related to screening of small-scale MHD waves by the ionosphere.

ДИНАМИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ И ДЕКАМЕТРОВЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ МОЩНОМ КВ-ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИОНОСФЕРНУЮ ПЛАЗМУ НАД СТЕНДОМ СУРА В ОБЛАСТИ ЧЕТВЕРТОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ГИРОГАРМОНИКИ.

Сергеев Е.Н., Вертоградов Г.Г., Зыков Е.Ю., Грач С.М., Шиндин А.В.

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

Одновременные исследования динамических и спектральных характеристик искусственных декаметровых неоднородностей в диапазоне поперечных к геомагнитному полю масштабов $l_{\perp} \sim 10-100$ м и искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) при мощном воздействии на ионосферную плазму в области частот четвертой гармоники гирочастоты электронов $4f_c$, впервые были выполнены 20-21 июня 2011 г. на нагревном стенде СУРА (Васильсурск, измерения ИРИ), лаборатории “Сигнал” ЮФУ (Ростов-на-Дону, ~ 1100 км от СУРЫ, измерения ракурсного рассеяния в диапазоне частот 10-15 МГц) и Зеленодольской ионосферной обсерватории КазФУ (Казань, ~ 170 км от СУРЫ, измерения ракурсного рассеяния в диапазоне частот 2-7 МГц).

Программа измерений состояла из дневного (14:30-16:00 мск.) и ночного (22:00-24:00 мск.) циклов наблюдений. Длительность нагрева днем составляла 2 мин., ночью – 1-1.5 мин с периодом 5 мин. Дополнительно в паузу нагрева излучались диагностические импульсы длительностью 20 мс (100 мкс в последний час) с периодом 1 с (100 мс). От сеанса к сеансу частота нагрева изменялась на 20 кГц в диапазоне частот волны накачки: $f_0 = 5440 - 5520$ кГц (20.06 день, $4f_c = 5440$ кГц), $f_0 = 5400 - 5480$ кГц (21.06 день, $4f_c = 5440$ кГц), $f_0 = 5320 - 5400$ кГц (20.06 ночь, $4f_c = 5320-5340$ кГц), $f_0 = 5310 - 5390$ кГц (21.06 ночь, $4f_c = 5310-5340$ кГц). Эффективная мощность передатчиков для О-моды излучения в зенит составляла $P \sim 60-120$ МВт. Измерения ИРИ по пропаданию DM и появлению BUM в спектре излучения [1] позволяли определять положение частоты волны накачки относительно четвертой гирогармоники, динамика диагностического ИРИ после выключения нагрева сопоставлялась с динамикой ракурсно рассеянных сигналов. Подобные сигналы наблюдались на сетке частот 9996, 14996 и 15465 кГц (радиостанции в Подмосковье) в ЮФУ, отвечая масштабам рассеяния $l_{\perp} \sim 10$ м, и частот 2020, 2520, 3020, 3520, 4020, 4520, 5360, 5920, 6420 и 6920 кГц с инозонда “Циклон” в КазФУ, отвечая масштабам рассеяния $l_{\perp} \sim 40-120$ м. Если исследования динамики рассеяния для масштабов $l_{\perp} \sim 10$ м вблизи гирогармоник проводились и ранее [2], то для более крупных декаметровых масштабов такие измерения проведены впервые.

Для дневных часов проведения экспериментов рассеянные сигналы наблюдались лишь в ЮФУ для максимальных частот зондирования и лишь единичные сеансы рассеяния были зарегистрированы для $f = 6920$ кГц в КазФУ при нагреве выше 4-й гирогармоники. В ночных измерениях рассеянный сигнал наблюдался практически всегда для всей сетки регистрируемых частот, имел максимальные значения при максимальной положительной отстройке частоты волны накачки от частоты гирогармоники $f_0 - 4f_c \sim 40$ кГц, и значительно уменьшался по интенсивности при прохождении частотой нагрева частоты гирогармоники и ниже нее. В измерениях не было обнаружено резкого возрастания времен релаксации наиболее крупных декаметровых неоднородностей и диагностического ИРИ в ночное время суток, ранее наблюдавшееся в исследованиях [4]. Последнее явление (отсутствие замедления релаксации) характерно для периода летнего солнцестояния в освещенной ионосфере.

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

1. Leyser T.B. // Space Sci. Rev. 2001. V. **98**. P. 223
2. Ponomarenko P., Leyser T.B. et al. // JGR. 1999. V. **104**. P. 10 081.
3. Фролов В.Л., Болотин Г.Г. и др. // Изв. ВУЗов. Радиофизика 2012. Т. **55**. С. 393.
4. Сергеев Е.Н., Зыков Е.Ю. и др. // Изв. ВУЗов. Радиофизика 2012. Т. **55**. С. 79.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ, РАСПРОСТРАНЕНИЯ И РЕЛАКСАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ МОЩНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ.

Сергеев Е.Н., Грач С.М., Шиндин А.В.

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

Воздействие мощного КВ радиоизлучения на ионосферную плазму, производимое на существующих нагревных стендах (СУРА - Россия; HAARP, Аресибо - США; EISCAT - Норвегия) приводит к образованию различных искусственных низкочастотных возмущений плотности и температуры плазмы и различных мод высокочастотных плазменных волн. Для исследования динамических и спектральных свойств плазменных возмущений различной природы разработан метод их диагностики с помощью коротких импульсов мощного воздействия, когда передатчики стендов переходят от достаточно длительного нагрева плазмы в режим КВ-радар. При этом излучаются короткие импульсы длительностью 20-200 мкс с периодом 20-200 мс и средней непрерывной мощностью излучения $\leq 0.5-1$ МВт, ниже порогов генерации и поддержания искусственной плазменной турбулентности различного типа. Данные импульсы могут излучаться во время короткой паузы $\sim 20-40$ мс при использовании квазинепрерывного режима нагрева импульсами длительностью 70-960 мс с периодом 100 мс - 1 с для исследования процессов генерации плазменных возмущений, а также после нагрева для исследования процессов их релаксации. Использование одного из передатчиков стенда в режиме КВ-радар на сдвинутой частоте относительно частоты волны накачки позволяет исследовать низкочастотные плазменные возмущения на различных высотах возмущенной нагревом области ионосферы, как правило, сильно вытянутой вдоль геомагнитного поля. Использование для диагностики коротких импульсов мощного радиоизлучения, имеющих широкий спектр (до 300 кГц) позволяет одновременно комплексно решать несколько задач исследования искусственной плазменной турбулентности, а именно:

- использовать измерения вариаций фазы импульсов для широкополосного доплеровского зондирования при диагностике процессов модификации профиля электронной концентрации в нагревных экспериментах и определения скоростей вертикального движения плазмы [1];
- использовать измерения вариаций амплитуды импульсов при диагностике величины аномального ослабления зондирующих волн в возмущенной области в широком диапазоне частот [2], а также для определения поля горизонтальных скоростей плазмы при приеме на разнесенные антенны [1];
- использовать практически безинерционную генерацию плазменных волн и искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) такими импульсами в условиях квазинепрерывного нагрева плазмы и ее последующего зондирования на стадии релаксации возмущенной области с анализом свойств ИРИ по окончании короткого импульса на стадии быстрой релаксации плазменных волн ($\sim 1-5$ мс);
- использовать рассеяние импульсов на искусственных периодических неоднородностях D- и E-областей ионосферы [4].

Обсуждаются достоинства, взаимодополняемость и примеры применения каждого из методов дистанционной диагностики искусственной ионосферной турбулентности.

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

1. Shindin A.V., Sergeev E.N. et al. // Radio Science 2012. V. **47**. doi:10.1029/2011RS004895
2. Sergeev E.N., Grach S.M. et al. // Radio Science 2018. V. **53**. P. 1506.
3. Сергеев Е.Н., Грач С.М. и др. // Изв. ВУЗов. Радиофизика 2016. Т. **59**. С. 970.
4. Бахметьева Н.В., Грач С.М. и др. // в этом выпуске.

**ULF-ELF FLUCTUATIONS OF GEOMAGNETIC FIELD IN THE UPPER IONOSPHERE.
MODEL AND OBSERVATIONS, AS MEASURED AT SWARM**

Fedorov, E. N. Mazur N. G., Pilipenko V. A., Yagova N. V.

We examine excitation of ultralow frequency (ULF) electromagnetic waves by an atmospheric lightning stroke in the upper ionosphere and the role of the ionospheric Alfvén resonator (IAR) in this process. A numerical model is developed and the spatial and spectral structures of electromagnetic disturbance in the ULF frequency range 0.1–6.0 Hz in the ionosphere is calculated. The model takes into account coupling between IAR and the ionospheric waveguide modes. The spectra of horizontal magnetic and electric components reveal a spectral multiband structure in the upper ionosphere. The form of spectra depends significantly on the horizontal distance ρ from the source: spectral peaks associated with the IAR are evident at $\rho \leq 400$ km, whereas at $\rho \geq 1000$ km the spectral peaks ($f > 4$ Hz) corresponding to the ionospheric waveguide modes can be seen. The pulse amplitude decays rather slowly with distance. Detection of ULF response in the upper ionosphere to isolated intense lightning stroke by low-orbiting satellites with magnetic or electric sensors onboard is quite feasible. We analyze the waveforms of magnetic field variations at IAR frequencies in the upper ionosphere measured by SWARM during the intervals with extreme lightning amplitudes and compare them with the theoretical estimates.

This research is supported by RFBR grant 18-05-00108

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СТРИМЕРНЫХ РАЗРЯДОВ

**В.С. Сысоев¹, Ю.А. Кузнецов¹, Д.И. Сухаревский¹, М.Ю. Наумова¹, Н.М. Лепехин¹
Л.М. Макальский², А.В. Кухно²**

¹Российский Федеральный Ядерный Центр-ВНИИ технической физики им. акад.
Е.И. Забабахина, ВНИЦ 900, г. Истра, РФ

²НИИУ Московский энергетический институт (ТУ), Москва
v.s.sysoev@vniitf.ru

Возникновение и развитие молниевых разрядов (в том числе и межоблачного) связано с такой формой электрического газового разряда, как стримерный. Стримерная форма присутствует и при развитии разряда в длинных воздушных промежутках, на проводах линий высокого напряжения, в устройствах для генерации озона и т.д. При этом известно, что стримеры, предшественником которых являются электрические лавины, генерируют радиоизлучение (в мегагерцовом и гигагерцовом диапазоне) [1,2]. Это излучение используется в системах грозопеленгации.

Экспериментальное изучение радиоизлучения стримерных разрядов в естественных условиях сталкивается с большими техническими трудностями. Поэтому возможность изучения радиоизлучения в лабораторных условиях дает большие экспериментальные возможности. На Комплексном Высоковольтном Стенде (ВНИИ Технической Физики отделение в г. Истра, <http://www.vniitf.ru/velk-business>) имеются установки, которые позволяют изучать в лабораторных условиях радиоизлучение стримерных разрядов:

- генератор импульсных напряжений Маркса с амплитудой до 6 МВ, позволяющий создавать многометровые искры, в процессе развития которых возникает так называемая стримерная зона, состоящая из множества стримеров.

- физическая модель грозовой ячейки, позволяющая получать одноэлектродные искровые разряды из облака заряженного водного аэрозоля, в которых возникают длинные стримеры (до 2м).

- высоковольтный наносекундный генератор, позволяющий получать стримерные разряды (положительной полярности) длиной до 15 см в импульсно-периодическом режиме

В первых двух установках генерируются стримерные разряды в импульсном режиме, что сильно технически осложняет проведение исследования. В третьем случае (импульсно-периодический режим) такие исследования значительно упрощаются.

Применение специальной измерительной радиотехники (в диапазоне от единиц МГц до единиц ГГц) позволяет измерять характеристики стримерного излучения синхронно с записями их электрических и оптических характеристик. Это открывает экспериментальные возможности для установления взаимосвязей между параметрами радиоизлучения стримеров и их электрическими и оптическими характеристиками.

1. Болотов В.Н., Ткач Ю.В. // Электромагнитные Явления, 2003, Т.3, № 2 (10), С.236÷255.
2. Сысоев В.С., Кузнецов Ю.А., Булатов М.У. и др. // XIII Международная конференция «Забабахинские научные чтения». 20÷24 марта 2017г., Снежинск, Челябинская область, Россия, 3-42, С.145÷146.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ВОДУ И ВОДНУЮ СРЕДУ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ

Цетлин В.В., Мойса С.С., Сергеев О.В.

Государственный научный центр РФ – Институт медико-биологических проблем РАН
v_tsetlin@mail.ru

Рассмотрена физико-химическая природа эффекта воздействия окружающей среды на Биосферу Земли и среду их обитания. В основе обнаруженных А.Л.Чижевским сто лет тому назад биологических процессов, протекающих в биоте под влиянием факторов солнечной активности, лежат окислительно-восстановительные реакции в клетках и межклеточной среде организмов. А как считал А.-Л. Лавуазье, «жизнь – непрерывная цепь окислительно-восстановительных процессов», следовательно, изучаемая проблема является весьма актуальной. Установлено, что наблюдаемые окислительно-восстановительные реакции, протекающие в воде и в водной среде различных коллоидных систем живых организмов, происходят в результате активации молекул воды в основном под действием электромагнитного излучения (ЭМИ) - поглощения широкополосного высокочастотного (ВЧ) диапазона, образующегося в ионосферной плазме. Получено, что активация молекул воды, являющейся дисперсионной средой всех коллоидных растворов живых систем, сопровождается диссоциацией молекул воды и изменением концентрации ионов гидроксония H_3O^+ , гидроксила OH^- , супероксида кислорода O_2^- , различных водных радикалов типа гидроксильного радикала $\text{OH}^\bullet$. В дальнейшем образованные в результате активации воды радикалы воздействуют (окисляют) на элементы дисперсной фазы коллоидных растворов живых организмов. По нашему мнению, в этом состоит биологическое действие электромагнитного излучения, приводящее к нарушению обменных и регуляторных процессов в облученных живых организмах. Пропорциональная электронной плотности (Ne) интенсивность ВЧ излучения плазмы ионосферы определяет временную и пространственную вариабельность интенсивности излучения ионосферы и может вызываться влиянием на плотность ионосферной плазмы различными параметрами солнечной активности. Возможно, описанная картина биологического действия окружающей среды характеризует один из путей реализации эффектов Чижевского. В ионосфере, практически, происходит усиление (до трех порядков) магнитосферных и солнечных возмущений. На наш взгляд, благодаря этому удастся наблюдать временные – сезонные, суточные вариации, вызываемые различными факторами солнечной активности: потоками солнечного ветра, спорадическими выпадениями авроральных заряженных частиц, колебаниями в атмосфере Земли плотности нейтральной компоненты таких газов, как O_2 , N_2 и ионов O_2^+ , NO^+ и N^+ , возмущений геомагнитного поля и еще многого другого. Обобщенный анализ полученных многолетних экспериментальных данных по пространственному и временному распределению вариаций электрических токов в водных электрохимических ячейках, а также суточной, сезонной динамики вариаций окислительного потенциала и водородного параметра воды и данных по электромагнитному излучению, достигающему поверхности Земли, позволил сформулировать следующую гипотезу. *Воздействие различных космо-гео-гелиофизических факторов на Биосферу Земли осуществляется посредством электромагнитного излучения ионосферной плазмы.*

Открывшаяся экспериментальная возможность наблюдения влияния гео- и гелиофизических явлений в геосферах, особенно в Биосфере Земли, на окислительно-восстановительные процессы в водной среде позволяет объяснить механизмы воздействия окружающей космической среды на биоту.

О ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИНАХ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗИМНЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ АНОМАЛИИ ДИНАМО СЛОЯ АВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ В РАЙОНЕ ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ НОРВЕГИИ

Е.Е. Тимофеев¹, С.Л. Шалимов^{2,3}

¹ *Государственный Университет Морского и Речного Флота им. адм. С.О. Макарова, С.-Петербург*

² *Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта, РАН, Москва*

³ *Институт космических исследований, РАН, Москва*

В работе используется банк данных параметров плазмы динамо слоя ионосферы (T_i , T_e , N_e , модуля и азимута E -поля), диагностированных радаром EISCAT в магнитном зените авроральной обс. Тромсё, в рамках международного эксперимента ERRIS. Температурная аномалия, $T.A. = (T_i - T_e)$, означает, что в большинстве измерений ERRIS в интервале высот от 102 до 110 км температура электронов регулярно оказывалась в среднем на (50-100 K) ниже температуры ионов, что противоречит всем известным моделям нижней ионосферы. При этом имеет место анти-корреляция временных вариаций температур ионов (ΔT_i) и электронов (ΔT_e). Величина коэффициента анти-корреляции показала рост в фазе с напряжённостью ионосферного E -поля, усредненной в пределах окна корреляции. Вблизи порога турбулизации плазмы (20-25 мВ/м), этот коэффициент достигал максимума (- 0,9), а затем резко падал до нуля при дальнейшем росте E -поля. Предложенная интерпретация описанной выше картины основана на модели прилипания электронов к частицам металлической пыли метеорного происхождения. Заряд таких частиц может достигать 10^3 элементарных зарядов. С учётом огромной массы частиц пыли практически вся энергия плазмы заключена в пылевой компоненте. Такие частицы становятся центрами ионосферных пылевых плазменных структур (ППС), которые существуют (по мере роста E -поля) до порога турбулизации. Кроме того, по данным ионозонда обс. Тромсё была выявлена зимняя аномалия роста критических частот, которая, однако, отсутствовала по данным ионозонда обс. Соданкюля, несмотря на практическое равенство геомагнитных широт этих обсерваторий. Учитывая сказанное, естественно попытаться искать причины отмеченной выше уникальности обс. Тромсё в особенностях, связанных с её географическим расположением (на береговой линии), которые могут оказать влияние на наблюдаемые ионосферные эффекты. Среди такого рода особенностей можно назвать «береговой эффект», а также инфразвук, порождаемый мощными ударами морских волн и распространяющийся, как известно, даже до F -области ионосферы, вызывая при этом свечение в линии 630 нм.

РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА ЕВРОПЫ

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

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, olqa8.92@mail.ru

В 1990-х годах миссия НАСА «Галилео» нашла доказательства существования глобального океана под ледяным покровом Европы, спутника Юпитера. Но поскольку орбита Европы расположена в радиационном поясе Юпитера, её поверхность подвержена сильному излучению, которое может разрушить органическую жизнь, (проникающую через разломы льда из океана на поверхность).

Наша задача найти на поверхности Европы области с наименьшими дозами радиации, в которых есть возможность обнаружить органику. Для этого была разработана численная модель, позволяющая найти концентрацию протонов и электронов радиационных поясов Юпитера на поверхности Европы, и тем самым оценить радиационную обстановку.

1. Divine N., and H. B. Garrett, Charged particle distributions in Jupiter's magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1983. V. **88**. pp. 6889-6903.
2. Schilling N., K. K. Khurana and M. G. Kivelson, Limits on an intrinsic dipole moment in Europa // *JGR Planets*. 2004. V. **109**. P. E05006. Dio:10.1029/2003JE002166
3. Paranicas, C., J. F. Cooper, H. B. Garrett, R. E. Johnson, and S. J. Sturmer, Europa's Radiation Environment and its Effect on the Surface, in *EUROPA* // Space Science Series, University of Arizona Press, Tucson. 2009. pp. 529-544.
4. Truscott, P., D. Heynderickx, A. Sicard-Piet, and S. Bourdarie, Simulation of the Radiation Environment Near Europa Using the Geant4-Based PLANETOCOSMICS-J Model, *IEEE TRANS. NUCL. Sci.* 2011. V. **58**(6). pp. 2776 – 2784.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ КИСЛОРОДА O^+-O^{+8} С
ДИПОЛИЗАЦИОННЫМИ ФРОНТАМИ В СОПРОВОЖДЕНИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
КАК МЕХАНИЗМА ПОПОЛНЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ МАГНИТОСФЕРЫ
ЗЕМЛИ**

Пархоменко Е.И., Малова Х.В., Попов В.Ю., Панасюк М. И., Власова Н.А., Калегаяев В.В., Зеленый Л.М.

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

Работа посвящена исследованию механизмов пополнения радиационных поясов Земли многозарядными ионами кислорода в результате их ускорения в период магнитосферных суббурь. Построена численная модель, позволяющая исследовать перенос и ускорение частиц солнечного ветра восьми сортов: ионов кислорода O^+-O^{+8} в результате их взаимодействия с крупномасштабной турбулентностью и множественными диполизационными фронтами, которые характеризуются скачками нормальной компоненты магнитного поля. Показано, что под воздействием такого комбинированного механизма происходит многократное увеличение энергий ионов кислорода до максимального значения порядка десяти МэВ. При этом чем больше заряд ионов тем эффективней их ускорение и выше вероятность инжекции в область геостационарной орбиты (ГО). Выявлено, что ионы O^+-O^{+2} способны попасть в область ГО с $4.5 < L < 7.5$ в процессе переноса на диполизационных фронтах. Для ионов $O^{+3}-O^{+8}$ требуется дополнительный механизм, такой как крупномасштабная электромагнитная турбулентность, за счет которого они могут достигнуть энергий близких к усредненным экспериментально наблюдаемым в указанной области значений L оболочек.

МАГНИТОСФЕРЫ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Алексеев И.И., Беленькая Е.С., Парунакян Д.А., Лаврухин А.С., Пенсионеров И.А.
НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, iialexeev@mail.ru

Краткое изложение результатов, полученных при выполнении проекта «Разработка модели магнитосферы планеты Солнечной системы или экзопланеты с участием научно-исследовательских организаций и университетов стран-членов ЕС в рамках многостороннего сотрудничества в программе "Горизонт 2020" (проект Europlanet 2020 Research Infrastructure. Были выбраны четыре планеты Солнечной системы — Меркурий, Земля, Юпитер и Сатурн, которые обладают собственным магнитным полем и формируют около себя полость, свободную (или почти свободную) от плазмы солнечного ветра — магнитосферу. Кроме того, эти планеты в течение нескольких лет имели искусственные спутники, которые проводили прямые измерения магнитного поля.

Параболоидная модель магнитного поля, лежащая в основе моделей магнитосфер всех четырёх планет, основана на простых теоретических моделях взаимодействия плазмы солнечного ветра с планетарным магнитным полем. Помимо возможности экспериментальной проверки, успешное решение задачи построения универсальной модели магнитосферы планеты основанно на универсальности взаимодействия солнечного ветра с планетарным полем. Во всех четырех вышеперечисленных случаях магнитное поле планеты в районе дневной магнитопаузы хорошо описывается дипольным приближением. При этом дипольные моменты планет отличаются друг от друга в разы, плотность плазмы солнечного ветра также сильно изменяется — из-за радиального расширения солнечного ветра, однако его скорость и температура практически неизменны при движении от Меркурия до Сатурна. При этом физические процессы, контролирующие взаимодействие плазмы и магнитного поля, оказываются либо одинаковы, либо подобны.

Магнитосферы планет сохраняют свою специфику, определяемую как физическими размерами, так и конкретными деталями строения планетарной системы. В небольшой магнитосфере Меркурия отсутствуют кольцевой ток и радиационные пояса. На Земле захваченная в магнитном поле плазма формирует кольцевой ток вокруг планеты, временами создающий сильное понижение горизонтальной компоненты магнитного поля в районе экватора — так называемые магнитные бури. На Юпитере один из Галилеевых спутников — спутник Ио, являющийся самым вулканически активным телом в Солнечной Системе, постоянно выбрасывает вещество своих недр в магнитосферу, формируя тор Ио, который переходит в экваториальный плазменный диск. Этот эффект приобретает очень большое значение для глобальной структуры магнитосферы. Плазменный диск сильно искажает дипольное магнитное поле Юпитера, увеличивая размеры его магнитосферы почти в 2 раза. Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ грант RFMEFI61617X0084

1. Alexeev II, Belenkaya ES. Modeling of the Jovian magnetosphere // *Annales Geophysicae*. 2005. T. 23, No 3. С. 809–826.
2. Pensionerov I.A., Belenkaya E.S., Cowley S.W. H. [и др.] Analysis of Juno magnetic field data using the Jovian paraboloid magnetospheric model // *Annales Geophysicae Discussions*. 2018

ТОПОЛОГИЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ ДОМЕНОВ И ФОРМИРОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОННОГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА

(памяти Вадима Вовченко)

Е.Е. Антонова^{1,2}, М.О. Рязанцева², М.В. Степанова³, И.П. Кирпичев², И.Л. Овчинников¹, Н.В. Сотников⁵, В. Г. Воробьев⁴, О.И. Ягодкина⁴, М.С. Пулинец¹, С.С. Знаткова¹, С.К. Мить⁵, П.С. Казарян⁵

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

²*Институт Космических Исследований РАН*

³*University of Santiagode Chile*

⁴*Полярный Геофизический институт*

⁵*Физический факультет МГУ*

Суммированы результаты исследований топологии магнитосферных доменов, приводящие к существенной перестройке сложившихся представлений. В ходе первого этапа исследований были восстановлены подвергшиеся критике представления о доминирующем вкладе кольцевого тока в формировании Dst вариации. В ходе второго этапа исследований методом морфологического проецирования (без использования какой-либо модели магнитного поля) было показано, что основная часть аврорального овала проецируется не на плазменный слой, как считалось ранее, а на внешнюю часть кольцевого тока на геоцентрических расстояниях от 7 до 10-12 R_E . Данный вывод подтверждают результаты наблюдений проекта МЕТЕОР, в соответствии с которыми полярная граница внешнего электронного радиационного пояса находится внутри аврорального овала. Во время магнитных бурь авроральный овал расширяется и сдвигается на низкие широты, а полярная граница внешнего радиационного пояса в соответствии с данными проекта МЕТЕОР может совпадать с полярной границей овала.

Перекрытие областей внешнего радиационного пояса и аврорального овала имеет существенное значение для решения вопроса о механизмах ускорения и потери релятивистских электронов. Все магнитные бури разделяются на три класса: на бури, приводящие к ускорению электронов внешнего пояса (около половины всех бурь); бури, после которых происходит падение потоков электронов внешнего пояса (около четверти всех бурь) и бури, после которых потоки электронов восстанавливаются до практически предбурового уровня. Показано, что внешний радиационный пояс образуется во время фазы восстановления магнитной бури только если достаточно интенсивные суббури возникают во время фазы восстановления магнитной бури. Суббури во время главной фазы бури не приводят к ускорению электронов внешнего пояса, а их развитие приводит к резкому падению потоков. Продемонстрирована роль адиабатического эффекта в восстановлении потоков релятивистских электронов во время бури, приведшей к восстановлению потоков релятивистских электронов практически до предбурового уровня. Объяснение наблюдаемых эффектов требует создания моделей магнитного поля учитывающих формирование «ям» магнитного поля в результате локальных увеличений давления. Формирование таких «ям» при локальных повышении давления на геоцентрических расстояниях $< 9 R_E$ было зарегистрировано на всех MLT даже в магнитоспокойные периоды [Vovchenkoetal., 2018, doi:10.1016/j.jastp.2017.08.024]. Локальные ямы магнитного поля формируют локальные магнитные ловушки для энергичных частиц. Учет захвата частиц в такие ловушки существенно модифицирует анализ процессов ускорения и потерь релятивистских электронов.

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКОВ
ЭЛЕКТРОНОВ СУБРЕЛЯТИВИСТИЧЕСКИХ ЭНЕРГИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ
КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА "ВЕРНОВ"**

**А.В. Богомолов¹, М.И. Панасюк^{1,2}, С.И. Свертилов^{1,2}, В.В. Калегаяев¹, В.В. Богомолов^{1,2},
И.Н. Мягкова¹, В.Л. Петров¹, А.В. Прохоров², И.В. Яшин¹**

*1 – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,
aabboogg@sinp.msu.ru*

2 – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет

Изучение пространственного распределения и динамики потоков электронов субрелятивистских энергий (от нескольких десятков до сотен кэВ) проводилось в ходе космического эксперимента на спутнике «Вернов». Спутник «Вернов» был выведен 8 июля 2014 г. на солнечно-синхронную около-круговую орбиту с параметрами орбиты: высота перицентра 640 км, высота апоцентра 830 км, наклонение 98° , период около 90 м. В состав аппаратуры РЭЛЕК на спутнике «Вернов» входил спектрометр жесткого рентгеновского, гамма-излучения и электронов ДРГЭ, включавший четыре высокочувствительных сцинтилляционных фосвич-детекторов NaI(Tl)/CsI(Tl) суммарной площадью $\sim 500 \text{ см}^2$, направленных в нади́р и обеспечивавших регистрацию рентгеновских и гамма-всплесков в диапазоне от 10 кэВ до 3 МэВ и электронов в диапазоне энергий от 0.5 до 15 МэВ, а также спектрометр электронов (0.2-10.0 МэВ), включавший три взаимно-ортогональных детекторных узла, каждый с геометрическим фактором $\sim 2 \text{ см}^2 \text{ ср}$, что позволяло оценивать питч-угловое распределение и выделять высыпавшиеся частицы. Была предусмотрена как непрерывная запись скорости счета регистрируемых частиц и квантов с временным разрешением 1с, так и фиксация времени регистрации каждого гамма-кванта (или электрона) со скважностью $\sim 15 \text{ мкс}$. Это позволило не только проводить детальный анализ динамики потоков частиц, но и сопоставлять временные профили с другими данными приборов комплекса, а также с данными других космических аппаратов и наземных измерений.

Были получены карты глобального распределения в околоземном пространстве потоков электронов с энергиями от сотен кэВ до МэВ, а также их распределения по дрейфовым оболочкам, локальному времени и геомагнитной долготе. Проведено сравнение распределения потоков электронов и интенсивности излучения атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне. Максимумы интенсивности УФ излучения по сравнению с электронами распределены более однородно, по крайней мере, в одном случае удалось наблюдать коррелированное по времени изменение интенсивности электронов и УФ излучения.

Был также проведен анализ кратковременных (длительностью $\sim 1 \text{ с}$) возрастных изменений интенсивности потоков электронов с энергиями порядка сотен кэВ. В основном такие возрастания наблюдались в областях высыпаний из внутреннего пояса ($L \sim 1.6 - 1.8$), а также в районах, примыкающих к внешнему поясу ($L \sim 2.5 - 2.7$). При этом отдельные возрастания фиксировались на $L < 1.6$. Нельзя исключить, что их природа, возможно, обусловлена воздействием атмосферных факторов, например, высотными электрическими разрядами.

**ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ
КРАТКОВРЕМЕННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ,
НАБЛЮДАВШИХСЯ НА СПУТНИКЕ "ЛОМОНОСОВ"**

**А.В. Богомолов¹, М.И. Панасюк^{1,2}, С.И. Свертилов^{1,2}, В.В. Калегаев¹, В.В. Богомолов^{1,2},
В.Л. Петров¹, И.В. Яшин¹**

*1 – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,
aabboogg@sinp.msu.ru*

2 – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет

В августе 2016 г. проводились наблюдения высыпаний магнитосферных электронов релятивистских и суб-релятивистских энергий на спутнике «Ломоносов» одновременно с экспериментами на высотных аэростатах BARREL.

Аэростаты BARREL запускались каждые 1-2 суток в вечерние часы на высоту ~40 км в одной и той же точке пространства вблизи г. Кируна (Швеция), соответствующей $L \sim 5.6$. Регистрация высыпающихся электронов в экспериментах BARREL осуществлялась по тормозному рентгеновскому излучению, потоки которого измерялись с помощью сцинтилляционного детектора на основе NaI(Tl).

Спутник «Ломоносов» был выведен 28 апреля 2016 г. на солнечно-синхронную орбиту, круговую с высотой 490 км, наклонением 98.4° и периодом обращения 90 мин. Таким образом, каждые сутки он проходил вблизи точки запуска аэростатов BARREL и практически на каждом витке четыре раза (два в Северном и два в Южном полушариях) пересекал дрейфовую оболочку $L \sim 5.6$. Регистрация электронов высоких энергий осуществлялась по тормозному излучению с помощью спектрометра жесткого рентгеновского, гамма-излучения и электронов БДРГ, включавшего три высокочувствительных сцинтилляционных фосвич-детекторов NaI(Tl)/CsI(Tl) суммарной площадью $\sim 400 \text{ см}^2$, оси которых были направлены под углами в 90° друг относительно друга, что позволяло оценивать питч-угловое распределение и выделять высыпающиеся частицы. При этом была предусмотрена как непрерывная запись скорости счета регистрируемых частиц и квантов с временным разрешением 0.1 с, так и фиксация времени регистрации каждого гамма-кванта или электрона с точностью ~ 1 мс, а также их энергии. Это позволяло не только проводить детальный анализ переменности, но и сопоставлять временные профили с результатами измерений других приборов комплекса, а также с данными других космических аппаратов, баллонных и наземных измерений.

В ходе экспериментов BARREL фиксировались возрастания интенсивности рентгеновского излучения, обусловленные высыпаниями электронов преимущественно из хвоста магнитосферы. Временные профили этих возрастных, записанные с высоким разрешением (~ 10 мс), характеризуются сильной изрезанностью и наличием особенностей длительностью десятки миллисекунд. Измерения потоков электронов на спутнике «Ломоносов» во время пересечения дрейфовых оболочек, соответствующих области измерений на аэростатах BARREL в максимально близкие интервалы наблюдений также показали наличие возрастных интенсивности с характерными временами в диапазоне от миллисекунд до нескольких секунд. Получены детальные временные профили этих возрастных и построены аппаратные энергетические спектры. Результаты измерений показали, что характер временных вариаций и форма энергетических спектров практически одинаковы на разных временных масштабах.

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ПОЛЯРНОГО ВЕТРА НА НОЧНОЙ ПОЛЯРНОЙ ГРАНИЦЕ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА

Чугунин Д.В.^{1,2}, Чернышов А.А.^{1,2}, Могилевский М.М.¹

¹*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, dimokch@iki.rssi.ru*

²*Западное Отделение (филиал) ИЗМИРАН, Калининград, Россия*

Исследуется нагрев ионов H^+ и O^+ поперек магнитного поля на полярной границе авроральной области во время геомагнитных возмущений. В работе используются измерения электронов и ионов с энергиями от 1 эВ до 20 кэВ, полученные во время работы спутника Интербол-2 (Авроральный зонд) на высоте ~18000 км. Орбита Аврорального зонда позволяла находиться спутнику в авроральной области в течение часа. В апогее зонд пересекал магнитные силовые линии с малой скоростью (~1 км/с), что позволило проводить наблюдения развития физических процессов во времени. Используя эту особенность орбиты, были проведены исследования скорости нагрева ионов в альфвеновской области во время расширения аврорального овала к полюсу. Измерение прибора UVI, который был установлен на спутник Polar, позволило получить скорость расширения полярной границы поперек магнитных силовых линий. Было получено, что в выбранной области происходит сильный нагрев ионов водорода вплоть до 100 эВ/с и более, который оказывается более интенсивным, чем циклотронное ускорение. Также было обнаружено, что более интенсивный нагрев происходит на границе, которая перемещается к полюсу с большей скоростью.

Авторы благодарят СовоЖ.-А., Ковражкина Р.А. и М. О. Fillingim за предоставленные данные. Работа Чугунина Д.В. и Чернышова А.А. была поддержана фондом РФФ (грант №17-77-20009).

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЫСОТЫ

Чугунин Д.В., Чернышов А.А., Моисеенко И.Л., Могилевский М.М.

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

Авроральное километровое радиоизлучение (АКР) представляет собой мощное естественное излучение в диапазоне частот 30 – 800 кГц, возбуждаемое при инжекции энергичных заряженных частиц из хвоста магнитосферы в авроральную область. Источником АКР является циклотронная мазерная неустойчивость, развивающаяся в областях с пониженной плотностью плазмы, где гирочастота электронов больше плазменной частоты. В работе используются данные измерений прибора ПОЛЬРАД, который был установлен на спутнике Интербол-2 (Авроральный зонд). Измеренная на спутнике частота АКР соответствует гирочастоте электронов на высоте генерации. Для изучения высотной зависимости генерации АКР использовался вейвлет-анализ для каждой частоты измерений. В результате были получены спектры для каждой частоты, что соответствует высоте, на которой происходит генерация АКР. Показано, что наклон вейвлет-спектра меняется с высотой, что указывает на не постоянные вдоль магнитного поля свойства среды в области продольного ускорения частиц.

Работа поддержана РФФИ (проект 18-29-21037).

ГЛУБИННОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ГАЛИЛЕЕВЫХ СПУТНИКОВ ПО ДАННЫМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ РАДИОШУМА МАГНИТОСФЕРЫ ЮПИТЕРА

Илюшин Я.А., Hartogh P.

МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, ilyushin@phys.msu.ru

Современные данные о геологии ледяных спутников Юпитера (Европы, Ганимеда и Каллисто) указывают на возможное присутствие сплошного глобального слоя жидкой воды (океана) под толщей ледяной коры. Значительный интерес к исследованию вопроса связан с возможностью существования в океанах перечисленных небесных тел неизвестных форм жизни. В этой связи запланирован и обсуждается ряд проектов по непосредственному измерению толщины ледяного покрова и получению данных измерений, позволяющих непосредственно проверить гипотезу о наличии океана.

Единственным способом проведения таких измерений с орбитальных космических аппаратов в настоящее время является зондирование электромагнитными волнами (радиолокация) [1]. Применение активных радиолокаторов ограничено высоким уровнем шумов магнитосферы Юпитера в рабочих диапазонах локаторов. Кроме того, существующие ограничения массы и габаритов космических аппаратов не допускают применения крупногабаритных антенных систем, необходимых для эффективного излучения широкополосных сигналов в низкочастотной области спектра, способных проникать в толщу льда на значительные глубины.

В докладе обсуждается возможность регистрации отражений шумового радиоизлучения магнитосферы Юпитера методом интерференционной рефлектотрии [2]. Проведено численное моделирование эксперимента, по результатам которого оценены возможности метода. Действующий прототип прибора, реализующего предлагаемый принцип измерений, изготовлен и опробован на отражениях шумовых радиосигналов от земной ионосферы. Результаты пробных измерений приведены на рисунке.

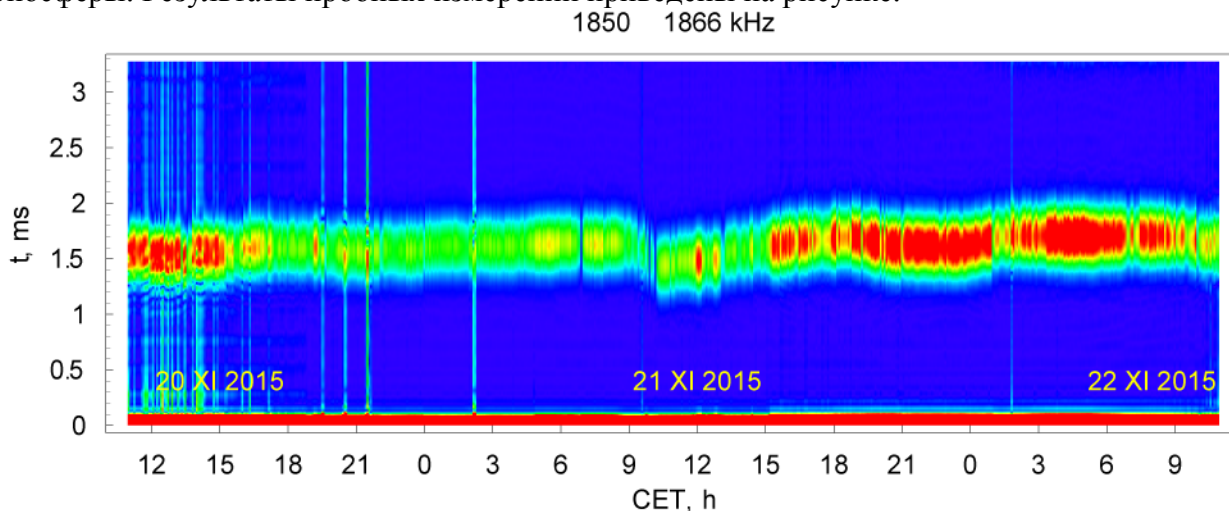


Рис.1. Интерферограмма отражений шумовых сигналов от земной ионосферы

Работа выполнена при частичной поддержке Немецкой службы академических обменов (ДААД), Общества Макса Планка (Германия), и Российского научного фонда РНФ, проект № 17-77-20087.

1. Ilyushin Ya.A. // Planetary and Space Science 2014. V. 92. P. 121.
2. Hartogh P., Ilyushin Y.A. // Planetary and Space Science 2016. V. 130. P. 30.

СОГЛАСОВАННАЯ ДИНАМИКА КОЛЬЦЕВОГО ТОКА И ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА

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

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

klg@dec1.sinp.msu.ru

Вариации солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) играют ключевую роль в динамике магнитосферы. Они, прямо, или опосредованно, контролируют развитие магнитосферных токовых систем, потери и ускорение захваченных частиц. Особый интерес представляют изменения двух популяций частиц, определяющих состояние магнитосферы: ионов кольцевого тока и энергичных электронов внешнего радиационного пояса. Развитие и распад кольцевого тока происходят, как в ответ на изменение условий в межпланетной среде, так и в связи с внутримagnetосферными процессами (магнитосферные суббури, волновая активность), также зависящими от условий в солнечном ветре и от ММП. Вариации кольцевого тока приводят к изменениям магнитного поля внутри области захвата энергичных электронов внешнего радиационного пояса, что существенным образом сказывается на динамике потоков электронов. На примере геомагнитных бурь 17-18.III.2015 и 22-23.VI.2015 с близкой амплитудой Dst-вариации (~200 нТл) исследовались вариации двух популяций захваченных частиц: ионов кольцевого тока и энергичных электронов внешнего радиационного пояса Земли. Сопоставление одновременных данных измерений потоков частиц спутниками Van Allen Probes, GOES, Electro-L, POES, Meteor-M позволяет сделать вывод о согласованной динамике кольцевого тока и внешнего радиационного пояса.

СРЕДНЕШИРОТНЫЕ И СУБАВРОРАЛЬНЫЕ КРАСНЫЕ ДУГИ

В.Л. Халипов (1), В.В. Афонин (1), Р.Ю. Лукьянова (1), И.Б. Иевенко (2), А.Е. Степанов (2), В.А. Панченко (3)

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

(2) ИКФИА СО РАН, пр. Ленина 31, г. Якутск, a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru

(3) ИЗМИРАН, г.Троицк, Москва

Анализируются комплексные оптические и ионосферные измерения в области слабых красных дуг, сопутствующих развитию поляризационного джета. Измерения проведены на субавроральных станциях Якутск и Маймага. Пространственное положение и интенсивность красной дуги определялась меридиональным сканирующим фотометром. Температура нейтральной атмосферы регистрировалась интерферометром Фабри-Перо. Результаты показывают, что температура нейтральной атмосферы увеличивается в области красной дуги, следуя за вариациями свечения в дуге. Так по измерениям 02.12.1989 г., температура нейтралов в области красной дуги возросла на 500 К относительно невозмущенного уровня, определенного за месяц по спокойным дням, что свидетельствует о процессе сильного разогрева нейтральной атмосферы в области красной дуги.

По ионосферным и спутниковым данным 18.02.1999 г. возникновение красной дуги сопровождалось поляризационным джетом, то есть образовалась полоса быстрого дрейфа ионосферной плазмы к западу под воздействием электрического поля северного направления. Величина этого поля в среднем составляет 50-80 мВ/м. Из-за фрикционного взаимодействия ионов и нейтралов происходит взаимный разогрев ионов до 5000-6000 К и нейтралов на сотни градусов.

По измерениям параметров тепловой плазмы на спутниках Aureul-3, DE-2, Космос-900, Интеркосмос-24, Интербол-2 рассматриваются вариации температуры электронов T_e в ионосфере на разных фазах магнитосферных возмущений. В структурах поляризационного джета протяженностью 2-3 градуса по широте T_e повышена до 3000-3500 К. Формирование таких структур связано с началом суббуревой активности и может совпадать с началом главной фазы магнитной бури. Интенсивный разогрев электронов в F- области до 5000 - 6000К в полосе 5-8 градусов по широте наблюдается на восстановительной фазе больших магнитных бури и является причиной формирования «классических» красных дуг (SAR-arc). Однако выраженность этого эффекта для событий с близкими значениями величины и скорости изменения Dst-индекса может разительно отличаться. Это позволяет предположить влияние какого-то дополнительного фактора.

По многолетним измерениям на спутниках обнаружен эффект нагрева электронов в верхней области F до 8000 К при воздействии на магнитосферу Земли альвеновских волн солнечного ветра.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР ИКИ РАН при частичной поддержке Программы № 28 ПРАН «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

О МАГНИТОСФЕРНО - ЛИТОСФЕРНЫХ СВЯЗЯХ

Хачикян Г.Я.

ИИ АО НЦКИТ, г. Алматы, Казахстан, galina.khachikyan@gmail.com

Используя данные глобального сейсмологического каталога NEIC Национальной геологической службы США с 1973г по настоящее время (~ 200 тысяч землетрясений с представительной магнитудой $M \geq 4.5$) и компьютерные коды магнитосферной модели Н. А. Циганенко (ГЕОРАСК), были рассчитаны для каждого эпицентра номер пронизывающей его геомагнитной линии (L), а также значения компонент геомагнитного поля в геоцентрической солнечно магнитосферной системе координат (GSM) в момент сейсмического события. Результаты показали:

- Частота возникновения землетрясений уменьшается с увеличением L , наблюдаемый тренд может быть аппроксимирован экспонентой с коэффициентом корреляции $R=0.98$; на фоне тренда выделяется L -промежуток $3.3 \leq L \leq 3.7$, где частота возникновения землетрясений статистически значимо понижена, что совпадает с пониженной заселенностью этих линий в радиационном поясе, так как они находятся в переходной зоне между его внутренней и внешней частями с ослабленной концентрацией захваченных частиц; также на фоне тренда выделяется L -промежуток $2.1 \leq L \leq 2.25$, где частота возникновения землетрясений статистически значимо повышена, что совпадает с повышенной заселенностью этих линий в радиационном поясе за счет захвата аномальных космических лучей.

- Образование дополнительных квазистационарных поясов заряженных частиц после геомагнитных бурь, например, вокруг $L \sim 2.6$ после бури 24 марта 1991г, обнаруженного космическими аппаратами «CRESS» и «Мир»; вокруг $L \sim 2.5$, $L \sim 3.0$ и $L \sim 4.0$ после серии геомагнитных бурь в июле - ноябре 2004г, обнаруженных спутником SERVIS-1; а также вокруг $3.0 \leq L \leq 3.5$ после магнитной бури 3 сентября 2012г, обнаруженного спутником «Van Allen Probes», сопровождалось усилением сейсмической активности в регионах, пронизанных геомагнитными линиями новых радиационных поясов.

- На сейсмоактивных территориях планеты, частота возникновения землетрясений повышена там и тогда, где и когда геомагнитная Z -компонента, рассчитанная в GSM системе координат, принимает большие положительные значения, а максимально возможную магнитуду землетрясения в конкретном сейсмоактивном регионе (сейсмопотенциал) можно оценить, в первом приближении, по максимально возможному в этом регионе абсолютному значению геомагнитной Z_{GSM} -компоненты.

Полученные результаты представляют интерес для решения практических задач сейсмологии, но требуют осмысления и разработки физического механизма, способного объяснить наблюдаемое соответствие между динамикой заселенности геомагнитных линий в радиационном поясе Земли и сейсмической активностью в основании этих линий в земной коре.

В докладе использованы результаты публикаций:

1. Galper M.A. // *Soros Educational Journal* 1999. № 6.
2. Лазутин Л.Л. // *Труды сем. «Физика авроральных явлений»* 2014, Апатиты, С. 29-37.
3. Thorne R. M., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2013, V. **40**. P. 3507–3511.
4. Khachikjan G., Inchin A., Zhakupov N., Kadyrkhanova N., Kaliyeva L. // *Proc. of the 7-the Kazakhstan-Chinise Int. Symp.* 2010. Almaty, Kazakhstan, P.358-363.
5. Khachikyan G., A. Inchin, A. Lozbin. // *Int. J. Geosciences* 2012. V. **3**. # 5. P. 1084-1088.
6. Khachikyan G., A. Sadykova, A. Inchin. // *Proc. of the EAGE 2018. Almaty. Kazakhstan.*
<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91645>).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАППА-АППРОКСИМАЦИИ ИОННЫХ СПЕКТРОВ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ДЛЯ СПОКОЙНОГО ПЕРИОДА.

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

На основании данных измерений потоков частиц международной миссии THEMIS проведена аппроксимация дифференциальных спектров ионов в экваториальной плоскости на расстояниях от 3 до 20 R_E . В качестве основной, глобально описывающей распределение ионов по энергиям, была взята каппа-функция. Статистика набрана за 4 года 2007-2010. Для восстановления спектров применялась разработанная командой THEMIS калибровка прибора SST, учитывающая изменение толщины мертвого слоя детектора. Выделялся спокойный период с $|Dst| < 20$ нТл и $|AL| < 300$ нТл. Получены двумерные картины распределения трех параметров каппа распределения: n_0 - концентрации, k - показателя наклона высокоэнергичного хвоста, E_0 - энергии теплового ядра распределения. Анализ поведения радиальных профилей этих параметров позволяет выделить несколько характерных областей магнитосферы Земли.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОКОЛОПЛАНЕТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ОСНОВЕ МГД И ГД МОДЕЛИРОВАНИЯ.

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

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

При исследованиях физических процессов вблизи околопланетных ударных волн обычно используются эмпирические модели последних. Теоретические МГД модели ударных волн являются хорошей базой для исследований, но из-за громоздких вычислений не могут быть использованы для анализа явлений при изменчивых параметрах солнечного ветра. Авторами продолжена разработка аналитической полуэмпирической модели ударной волны, основанной на теоретических МГД расчетах, точных аналитических решениях и экспериментальных данных.

Для случаев, когда магнитное поле солнечного ветра направлено вдоль его скорости или перпендикулярно вектору скорости, получены аналитические выражения, которые позволяют рассчитать параметры ударной волны – расстояние до подсолнечной точки, радиус кривизны и затупленность в подсолнечной точке – по газодинамическим параметрам, подробно рассмотренным ранее. Для случая, когда вектор магнитного поля перпендикулярен вектору скорости солнечного ветра, показано, что для аналитического описания поверхности ударной волны достаточно аппроксимировать ее параметры в 2-х перпендикулярных плоскостях.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР ИКИ РАН при частичной поддержке Программы № 28 ПРАН «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

КИНЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НОЧНОЙ МАГНИТОПАУЗЫ ЗЕМЛИ

Лукин А.С.^{1,2}, Артемьев А.В.^{3,1}, Петрукович А.А.¹, Юшков Е.В.^{1,4}

¹*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, as.lukin.phys@gmail.com*

²*Национальный исследовательский институт Высшая школа экономики, Факультет физики, г. Москва, Россия*

³*Университет Калифорнии, Лос-Анджелес, США*

⁴*МГУ им М.В.Ломоносова, Физический факультет, г. Москва, Россия*

В работе рассматривается статистика экваториальных пересечений магнитопаузы Земли на лунной орбите, собранная по данным наблюдений спутниковой миссии ARTEMIS. Показано, что давление потока плазмы магнитослоя не вносит существенного вклада в баланс давлений поперёк магнитопаузы, и, как следствие, поверхность магнитопаузы практически параллельна потоку плазмы в магнитослое. Используя одновременные измерения на двух спутниках ARTEMIS, удалось восстановить пространственный масштаб магнитопаузы и сопоставить его с типичными плазменными параметрами (ионный гирорадиус и инерционная длина), рассчитанными для ионов плазменного слоя и магнитослоя. Кроме того, показано, что магнитопауза «распадается» на несколько переходных слоёв, характеризующих перепады плотности, температуры, и кинетической энергии, и разнесённых в пространстве.

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ РАЗНЫХ МАСС (H^+ , He^+ , O^+) ВО ВРЕМЯ ДИПОЛИЗАЦИЙ В БЛИЖНЕМ ГЕОМАГНИТНОМ ХВОСТЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ CLUSTER/RAPID

Малыхин А.Ю., Григоренко Е.Е., Кронберг Е.А., Дали П.

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

В данной работе представлен анализ динамики сверхтепловых (50-700 кэВ) ионов разных масс (H^+ , He^+ , O^+) во время диполизаций в ближнем геомагнитном хвосте ($X < -16 R_E$) по данным инструмента RAPID миссии Cluster с 2001 по 2005 гг.

Ранее было показано, что в развитии диполизаций можно выделить несколько ключевых фаз [1], а именно: резкое возрастание вертикальной компоненты магнитного поля (B_z); и последующий более плавный рост B_z . Статистически установлено, что начало роста потоков сверхтепловых ионов наблюдается за 50 с до начала диполизации, и продолжается после резкого скачка B_z . Одновременно с ростом потоков наблюдается и уменьшение показателя степенного энергетического спектра (γ). Уменьшение γ начинается примерно за 50 с до начала диполизации и продолжается примерно в течение 30-40с после скачка B_z для протонов, и в течении 100с и 180 с для He^+ и O^+ соответственно. Для ионов O^+ отрицательная вариация γ в среднем в 2.5 раза больше, чем для более лёгких ионов. Таким образом, имеет место ускорение ионов разных масс во время фазы роста диполизации. При этом тяжёлые ионы испытывают более сильное ускорение, чем протоны.

Мы рассмотрели возможность неадиабатического механизма ускорения [2], предполагая, что частица ускоряется электрическим полем, связанным с диполизацией. Для этого была произведена оценка энергии (W) которую потенциально могла бы приобрести частица на разности потенциалов двигаясь поперёк диполизационного фронта. Полученные зависимости между вариациями показателя спектра ($\delta\gamma$) и W для ионов разных масс, свидетельствуют о возможной реализации данного механизма ускорения.

1. Grigorenko, E. E., Dubyagin, S., Malykhin, A. Y. // Geophys.Res.Lett. 2018. V. **45**. P. 602.
2. Greco A., Artemyev A., Zimbardo G. // Geophys. Res. Lett. 2015. V. **42**. P. 8280.

INTERCHANGE HEADS IN THE EARTH'S MAGNETOTAIL

Panov E.V.¹, Pritchett P.L.²

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

²*Department of Physics and Astronomy, University of California, Los Angeles, CA, USA.*

A fortuitous configuration of five Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (THEMIS) probes indicated that on February 15, 2008 between 04:00UT and 11:00UT a B_Z -dip with radial size of about 2.5 Earth radii (R_E) and azimuthal size that could be as large as $10R_E$ was present for over three hours in the plasma sheet at $X_{GSM} \sim -11R_E$. Ballooning/InterChange Instability (BICI) heads were observed at the tailward side of the dip with $\partial B_Z / \partial X \sim -10 \text{ nT} / R_E$. The BICI heads appeared to drift azimuthally toward dawn, in accord with Particle-In-Cell (PIC) simulations of a charged current sheet. The signatures of the latter, e.g., a finite average E_Z directed toward the center of the plasma sheet, are verified by the THEMIS data. One dawnward-drifting BICI head is studied taking advantage of the available high-resolution THEMIS observations and comparing with the PIC simulation run. A prediction of the earlier PIC simulation for a neutral sheet, that duskward-drifting BICI heads are subject to a current-driven ion-cyclotron instability, is found to be true also for dawnward-drifting BICI heads in the charged sheet simulations. This specific prediction and the THEMIS data indicate the presence of electromagnetic ion-cyclotron wave activity that ripples the background BICI head shape. The waves propagated azimuthally with $\delta E_Y / \delta B_Z \approx 4.5 V_A$. The waves are found in a region of the strongest differential drift between the electrons and ions, suggesting that the drift generated the waves.

РЕНОВАЦИЯ ПРОЕКТА «ГЕОМАГНИТНЫЙ МЕРИДИАН 145»

Зайцев А.Н.,^{1,2} Петров В.Г.,¹ Гамза Е.И.,¹ Петрукович А.А.,²

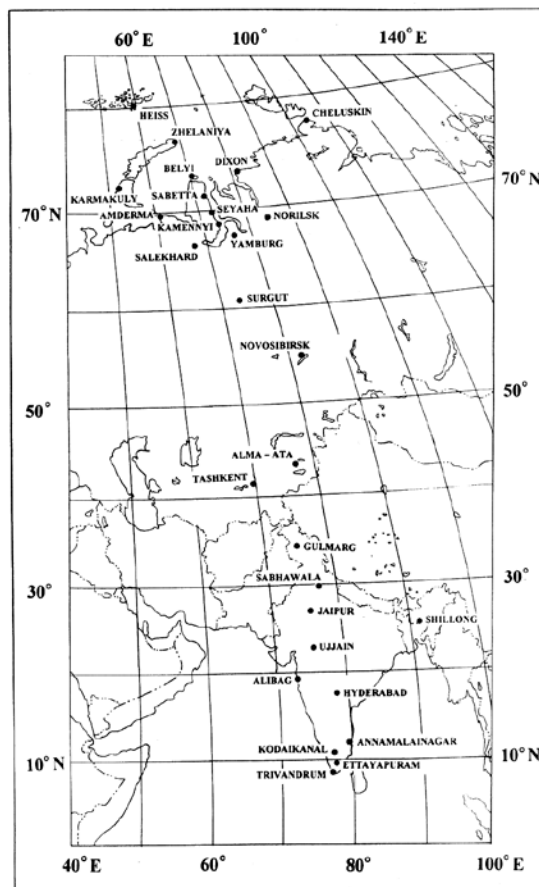
1 ИЗМИРАН, г. Москва (г. Троицк), Россия, alex.zaitsev1940@mail.ru

2 ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Метод исследований на геомагнитных меридианах для оценки состояния околоземного космического пространства по наземным данным и для изучения структуры и динамики токовых систем в ионосфере и магнитосфере в сопоставлении с прямыми измерениями на спутниках был развит в начале 70-х годов. В 1973 году сеть магнитометров на геомагнитном меридиане 145 градусов была оформлена как международный проект между СССР и Индией [1]. В дальнейшем меридиональные цепочки охватили все северное полушарие и послужили основой крупнейшей программы «Международные исследования магнитосферы», выполненной в 1976—1986 гг. [2]. По мере развития сетей магнитометров организация наблюдений совершенствовалась, с середины 80-х годов начали внедряться цифровые приборы, автоматизированные системы сбора и обработки наземных и спутниковых данных в режиме открытых справочных систем в реальном времени. В середине 90-х годов магнитные данные стали широко использоваться для целей прогнозов космической погоды.

После 1991 года проект «Геомагнитный меридиан 145» постепенно деградировал по мере выхода приборов из строя, сокращения наземных пунктов наблюдений и прекращения финансирования фундаментальной и прикладной науки. Начиная с 2009 года на Ямале начались работы по восстановлению «Геомагнитного меридиана 145» (1972 - 1998) [1], в той части которая сегодня известна под названием «Проект «Полярная геофизика Ямала» [3]. В 2014 году на конференции «Полярная геофизика Ямала: наблюдения, базы данных и информационные системы в практике освоения месторождений нефти и газа – ПОЛАР – 2014», см. <http://polar2014.yanao.ru>, была выработана стратегия развития полярной гелиогеофизики на ближайшие годы. Для практической работы ведется создание виртуальной геофизической лаборатории <http://ямалгео.рф/>, а также информационной системы «Аврора-Арктика» <http://aurora.geosmis.ru>.

В настоящее время (2019 год) сеть магнитометров в Арктике медленно восстанавливается с участием ИЗМИРАН и ИКИ, а также при поддержке компаний ГАЗПРОМА и местных научных организаций ЯНАО. Очевидно, что для более эффективной научной работы необходимо восстановить сеть магнитометров на всем протяжении меридиана вдоль географической долготы 75 градусов, примерно совпадающий с магнитным меридианом 145 градусов. Схема сети магнитометров представлена на рисунке.



1. Зайцев А.Н.// Проект "Геомагнитный меридиан", Вестник АН СССР 1974, 4, С. 92.
2. Kamide Y., Akasofu S.-I., Zaitsev A.N. et.al. // J.Geophys.Res. 1982. V. **87**, P. 8228.
3. Petrov V.G., Petrukovich A.A., Zaitsev A.N.//ILWS-2013. Irkutsk, poster.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И МЕЖПЛАНЕТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОКОЛОЗЕМНОЙ МАГНИТОПАУЗЫ НА ОСНОВЕ 3D МГД И АНАЛИТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

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

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

Параметры солнечного ветра, определяющие положение и форму геомагнитопаузы МП, вполне очевидны – это динамическое $\frac{1}{2}\rho V^2$ и тепловое $P_{\text{давл}} = k\rho T$ давления солнечного ветра, направление и величина межпланетного магнитного поля $\mathbf{B}$. На форму этой границы влияет также ориентация геомагнитного диполя $\mathbf{M}$.

Теоретически положение МП может быть рассчитано с использованием газодинамического, магнитогидродинамического, или гибридного моделирования. Однако такие модели, особенно две последние, используют сложные, непрозрачные коды, требующие массу процессорного времени для одного набора параметров.

Представляется целесообразным для теоретического/полуэмпирического моделирования магнитопаузы использовать не параметры невозмущенного солнечного ветра, а полное $P_{\text{tot}} = k\rho V^2(1 + (\sqrt{6}\sin^2\theta_{bv}/M_a^2)^{2/3})$, тепловое $P_{\text{th}} = k\rho V^2/(1 + 25\sqrt{\sin^2\theta_{bv}/M_a^2}(2 - \sqrt{6/M_s}))$ давление и давление магнитного поля $P_{\text{mag}} = P_{\text{tot}} - P_{\text{th}}$ в прилегающей к магнитопаузе части магнитослоя. В приведенных выше выражениях

M_a и M_s – Альвеновское и звуковое числа Маха, соответственно, а θ_{bv} – угол между направлениями солнечного ветра и магнитного поля. С использованием этих давлений можно показать, что при южном направлении межпланетного магнитного поля геоцентрическое расстояние до подсолнечной точки магнитопаузы описывается следующим

выражением: $r = r_0 \sqrt[3]{2\sqrt{k\rho V^2/P_{\text{tot}}} - 1}$, где r_0 – расстояние до подсолнечной точки при северном направлении межпланетного магнитного поля. На рисунке слева показано

соответствие этого аналитического выражения (сплошная и пунктирная кривые) результатам 3D МГД моделирования (Lu, Wang, Kabin et al., Planetary and Space Science, 106(2), 108, 2015, красные точки).

Дополнительными эффектами, поддающимися достаточно простому рассмотрению в рамках теоретического/полуэмпирического моделирования, являются сжатие геомагнитного хвоста под действием поперечной компоненты межпланетного магнитного поля и учет изменения наклона геомагнитного диполя при суточном вращении и годовом движении Земли по орбите.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР ИКИ РАН при частичной поддержке Программы № 28 ПРАН «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

**БЕСТРИГГЕРНЫЕ СУББУРИ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ Pc5/Pi3В
ВЫСОКИХ ШИРОТАХ**

Носикова Н.С., Ягова Н.В., Пилипенко В.А., Бадделей Л., Лоренцен Д.

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

Несмотря на то, что исследование суббурь продолжается уже более 50 лет, вопрос о физических механизмах развития суббурь без явного внешнего триггера остается не решенным. Анализ данных УНЧ колебаний на широтах полярной шапки и вблизи полярной границы аврорального овала [1] показывает более высокий уровень амплитуд УНЧ в диапазоне первых миллигерц перед суббурей по сравнению с бессуббуревыми интервалами. В отсутствие обычных триггеров, развитие суббури может происходить либо за счет резкого изменения параметров вне магнитосферы, которые обычно не учитываются, например, амплитуды флуктуаций, либо по бестриггерному механизму – за счет развития неустойчивости в хвосте магнитосферы. В данной работе анализируются флуктуации магнитного поля и параметров ионосферной плазмы за несколько часов перед бестриггерной изолированной суббурей. Отдельное внимание уделяется пульсациям в электронной плотности по данным радараEISCAT, расположенного на Шпицбергене, и их спектральным характеристикам на разных высотах.

1. Yagova N., Nosikova N., Baddeley L., Kozyreva O., Lorentzen D., Pilipenko V., Johnsen M // Ann. Geophys. 2017. V. **35**. P.365.

ВЫСЫПАНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ И ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ

Яхнин А.Г., Яхнина Т.А., Семенова Н.В.

Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия (ayahnin@gmail.com)

По данным спутников NOAA POES рассмотрено более 1500 событий высыпаний релятивистских (>1 МэВ) электронов (ВРЭ) за период июль-декабрь 2005 г. (магнитовозмущенный интервал), июль-декабрь 2009 г. (магнитоспокойный интервал) и июль-декабрь 2011 г. (умеренно возмущенный интервал). Критерии отбора событий описаны в работах (Yahnin et al., JGR, 2016; 2017). В каждом интервале события ВРЭ были разделены на три группы, соответствующие разным механизмам рассеяния в конус потерь. Для каждой группы построены карты распределения вероятности наблюдения ВРЭ в координатах MLT-L в зависимости от геомагнитной активности. Показано, что независимо от механизма высыпания вероятность наблюдения ВРЭ растет с ростом геомагнитной активности. Для каждой группы событий показано, что интенсивность потока релятивистских электронов не зависит от *текущей* геомагнитной активности. В то же время, *средний* за некоторый интервал поток высыпающихся релятивистских электронов оказывается пропорциональным средним значениям индексов геомагнитной активности в этом интервале.

ИНЖЕКЦИИ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ В АВРОРАЛЬНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ В СУББУРИО

Р.А. Ковражкин, А.Л. Глазунов, Г.А. Владимирова
ИКИ РАН, г. Москва, Россия, rkovrazh@iki.rssi.ru

В работе представлены результаты по исследованию основных характеристик высокоскоростных потоков электронов и протонов в ночном секторе авроральной области, выпадающих из плазменного слоя в ходе развития суббури. Анализ показал, что внутри ВВФ возникают всплески электронов с энергиями до 2 кэВ длительностью 15-20 с с периодом в диапазоне 60-100 с и повторяющиеся инжекции ионов до 10 кэВ длительностью 25-35 с с периодом ~ 180 с. Анализ проведен на основе базы данных спутника ИНТЕРБОЛ-2 на геоцентрических расстояниях 3-4 R_E , где R_E – радиус Земли. Функция распределения частиц плазменного слоя не испытывает существенной модификации на таких высотах из-за авроральных явлений, поэтому по структурам можно изучать процессы в самом слое. Энергия, поставляемая такими потоками частиц, является достаточной для интенсификации полярного сияния, наблюдаемого в ходе развития суббури, т.е. такие пучки могут играть ключевую роль в динамике центрального плазменного слоя в фазу экспансии суббури. Рассмотрены механизмы нагрева и ускорения инжектируемых частиц; основной из них может быть обусловлен импульсным магнитным пересоединением в магнитосферном хвосте.

АЛЬФВЕНОВСКИЙ РАДИУС В МАГНИТОСФЕРАХ ПЛАНЕТ

Беленькая Е.С.

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

Альфвеновский радиус играет существенную роль в магнитосферной и гелиосферной физике. Начиная с альфвеновского радиуса, солнечный ветер приобретает сверх-звуковую и сверх-альфвеновскую скорость. Перед всеми планетами, находящимися в таком потоке замагниченной плазмы, возникает стоячая ударная волна, а вокруг них образуются магнитосферы, в большей или меньшей степени, напоминающие земную. Скорость солнечного ветра остается примерно постоянной вплоть до termination shock – поверхности, расположенной на ~80-90 а.е. от центра Солнца, на которой солнечный ветер тормозится в результате взаимодействия с межзвездной средой. В доальфвеновском потоке замагниченной плазмы небесные тела, например, галилеевы спутники Юпитера образуют альфвеновские крылья.

В магнитосферах планет-гигантов Юпитера и Сатурна на расстоянии равном альфвеновскому радиусу от их центра происходит изменение структуры течения и магнитного поля. Почти твердотельная коротация магнитосферной плазмы нарушается, т.к. на альфвеновском радиусе плотности магнитной и кинетической энергий равны, под действием центробежной силы увеличивается радиальная скорость, магнитные силовые линии вытягиваются в дискообразную структуру. Этому процессу способствует большая скорость вращения планет-гигантов и наличие у них внутри-магнитосферных дополнительных источников плазмы (Ио у Юпитера и Энцелад у Сатурна). Из-за роста радиальной скорости возникает торможение азимутальной. Скачок азимутальной скорости магнитосферной плазмы на альфвеновском радиусе приводит к возникновению продольных токов более сильных на Юпитере и менее значительных на Сатурне (вследствие меньшей скорости поступления плазмы от Энцелада, чем от Ио).

Эти продольные токи вытекают из ионосфер двух полушарий планет и замыкаются на их ионосферах и в образованных дисках в экваториальной магнитосфере, а также продольными токами противоположного направления, втекающими в высокоширотную ионосферу. У Юпитера сила вытекающих продольных токов оказывается достаточной, чтобы вызвать дискретные полярные сияния в главных овалах, наблюдаемые в УФ свете на КТ Hubble, а у Сатурна они могут быть причиной более слабых полярных сияний, видимых в ИК свете на более низких широтах, чем основной овал.

Альфвеновские крылья от галилеевых спутников Юпитера, несущие сильные токи вдоль характеристик, вызывают свечения при пересечении с ионосферой планеты. Эти светящиеся пятна являются ионосферными проекциями расположенных в экваториальной магнитосфере лун и дают возможность судить о процессах, происходящих при магнитосферно-ионосферном взаимодействии. В частности, они позволяют пролить свет на механизм возбуждения полярных сияний на Юпитере, который в последнее время активно обсуждается в связи с результатами миссии Juno.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКОВ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ВДОЛЬ СИЛОВЫХ ТРУБОК ПЛАЗМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

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

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

В настоящее время практически отсутствуют данные о результатах прямых измерений холодной плазмы в плазмосфере вдоль магнитных силовых трубок (т.е. при $L = \text{const}$). Вместе с тем эти данные могут быть полезными для более полного понимания структуры плазмосферы и ее динамики.

Приводятся некоторые результаты измерений концентрации и температуры холодной плазмы в плазмосфере Земли на спутнике Интербол - 1 вдоль участков его орбит, проходящих вдоль геомагнитных трубок магнитосферы $1.5 < L < 4.5$. Разность между максимальным и минимальным значениями L -параметра для каждого рассматриваемого участка составляет $\sim 0.1 L$, а протяженность по долготе не превышает 15° .

Представленные результаты дают представление о динамике параметров холодной плазмы в глубине и на периферии плазмосферы в зависимости от уровня геомагнитной возмущенности. В целом распределения концентрации внутри плазмосферы соответствуют диффузионному равновесию вдоль магнитных трубок. Однако в отдельных случаях внутри плазмосферы наблюдаются значительные отклонения распределений $N(GMLat)$ от диффузионного равновесия, не связанные с изменениями геомагнитной обстановки.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР ИКИ РАН при частичной поддержке Программы № 28 ПРАН «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

СВЯЗЬ ПОРОГОВЫХ ЖЕСТКОСТЕЙ КОСМИЧЕСКИХ С ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ММП ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ В ИЮНЕ 2015 Г.

Данилова¹ О.А., Тясто¹ М.И., Вернова¹ Е.С., Сдобнов² В.Е

¹ Санкт-Петербургский Филиал ИЗМИРАН, md1555@mail.ru

² Институт Солнечно-земной физики СО РАН.

Климатические изменения последних десятилетий заставляют искать механизмы влияния различных факторов космической погоды на погоду и климат. Одним из важных факторов, определяющих космическую погоду, являются космические лучи (КЛ). Изменения потоков КЛ определяют ионизацию атмосферы, которая связана с такими атмосферными процессами, как, например, образование облачности, гроз, тропических ураганов. Вариации потоков КЛ в магнитосфере во время магнитосферных возмущений обусловлены в основном изменениями жесткости геомагнитного обрезания ЖГО (геомагнитных порогов) КЛ и их асимптотических направлений прихода в заданную точку магнитосферы.

Для периода сильной геомагнитной бури 21 – 25 июня 2015 были рассчитаны теоретические вертикальные эффективные геомагнитные пороги методом траекторных расчетов в магнитном поле возмущенной магнитосферы Цыганенко TS01 и проведено сравнение с экспериментальными жесткостями обрезания, полученными методом спектрографической глобальной съемки по данным мировой сети нейтронных мониторов. Эта буря характеризуется скоростью солнечного ветра более 740 км/с и $Dst = -204$ нТ. Проведен совместный анализ временных вариаций, полученных теоретических и экспериментальных геомагнитных порогов и связи их с параметрами солнечного ветра и ММП.

Основной вклад в изменения геомагнитных порогов КЛ во время бурь вносят кольцевые токи, усиливающиеся во время главной фазы бурь, т.е. Dst -вариация. Однако, основные черты динамики магнитосферы, связанные с поджатием магнитопаузы солнечным ветром наряду с усилением или распадом основных токовых систем тоже отражаются в геомагнитных порогах КЛ. В данной работе исследован характер связи изменения жесткостей обрезания с параметрами солнечного ветра и ММП.

Получено, что изменения теоретических геомагнитных порогов $\Delta R_{эф}$ хорошо коррелируют с Dst вариацией на всех рассмотренных станциях ($\sim 0,9$), в то время как корреляция экспериментальных геомагнитных порогов с Dst -вариацией несколько ниже. Корреляционная связь между Bz и $\Delta R_{эф}$ не очень высокая ($\sim 0,35$), однако связь между Bz и $\Delta R_{сгс}$ значительно ниже ($0,2$). Высокая корреляция наблюдается между экспериментальными и теоретическими порогами. Самая низкая же — с динамическим давлением солнечного ветра (P_{dyn}) $\sim 0,1$.

СУББУРЕВАЯ АКТИВНОСТЬ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ THD И THE И КАМЕРАМ MAIN В АПАТИТАХ

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

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

Проведен анализ суббуревой активности 24 декабря 2014 г. в интервале с ~16 до ~17:30 UT по спутниковым и наземным данным. В этот период суббуревые возмущения полей и потоков энергичных частиц были зарегистрированы на спутниках THE и THD, которые находились в полуночной магнитосфере на $r \sim 8.5-10.3$ Re. В наземных данных наблюдались возмущения в магнитном поле на станциях Тикси (TIK), Диксон (DIX), Амдерма (AMD), Ловозеро (LOZ), на некоторых станциях сети магнитометров IMAGE, а также были зарегистрированы сияния камерами всего неба MAIN в Апатитах (APT). Магнитная активность началась на станции DIX в $T_0 \sim 16:10$ UT, далее происходило усиление западного электроджета на более западных станциях, начиная от AMD в $T_1 \sim 16:35$ UT, и в $T_2 \sim 16:45$ UT возмущения были зарегистрированы в LOZ, где наблюдались также пульсации типа Pi 1B. Анализ наземных и спутниковых данных показал, что наблюдаемые на магнитометрах характерные вариации D-компоненты магнитного поля, их повторяемость на разных долготах при распространении движущегося на запад изгиба полярных сияний (WTS) свидетельствуют в пользу пространственного представления о вытекающем из ионосферы продольном токе, который расположен на западном краю распространяющейся активной области сияний. Дискретная, локализованная по широте, расширяющаяся на запад авроральная дуга типа аврорального 'horn', которая появлялась над APT примерно на 2 MLT к западу от области "onset" суббури, поддерживает такое представление. Почти одновременное начало роста магнитного поля и потоков плазмы на обоих спутниках (THE и THD), но с небольшим опережением на более восточном спутнике подтверждает азимутальное распространение возмущения в магнитосфере от области начала возмущения на запад.

КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ПОЯВЛЕНИЕ РАЗНЫХ ТИПОВ МАГНИТНЫХ СУББУРЬ

И.В. Дэспирак¹, А.А. Любчик¹, Н.Г. Клейменова²

¹ Полярный геофизический институт (ПГИ) г. Апатиты, Россия, despirak@gmail.com

² Институт Физики Земли (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

На основе данных сетей магнитных станций IMAGE и SuperMag, базы данных OMNI и каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>) проведен сравнительный анализ условий в солнечном ветре для появления разных типов магнитных суббурь. Исследовались три больших типа суббурь. Первый тип – «суперсуббури» (SSS), которые представляют собой особенно интенсивные суббури (SML < -2500 нТл и AE < -2500 нТл), второй тип – «расширенные» суббури, которые перемещаются из авроральных (<70°) в полярные (>70°) геомагнитные широты. Третий тип – «полярные» суббури, которые наблюдаются только на широтах выше ~70° при отсутствии одновременных геомагнитных возмущений на широтах ниже ~70°. «Полярные» суббури разделялись также по времени наблюдения на ночные и утренние «полярные» суббури. Утренние «полярные» суббури наблюдаются около 06-11 MLT (для сети IMAGE это 03-08 UT), ночные – в 21-03 MLT. Был проведен сравнительный анализ между появлением магнитных суббурь и разными типами потоков солнечного ветра. Рассматривалось 6 типов солнечного ветра: высокоскоростные потоки (FAST); межпланетные проявления коронального выброса массы – магнитные облака (MC) или EJECTA; области сжатой плазмы перед этими потоками (CIR и SHEATH); медленный солнечный ветер (SLOW). Показано, что во время межпланетных проявлений корональных выбросов массы (SHEATH, MC, EJECTA) чаще всего (~96%) появлялись суперсуббури, которые очень редко наблюдались во время высокоскоростных потоков FAST (~2%). Наоборот, во время FAST и области сжатия перед ними CIR наблюдалось большинство «расширенных» суббурь (~75%), которые отсутствовали во время магнитных облаков MC. Кроме того, часть «расширенных» суббурь (~18%) была зарегистрирована во время области сжатия SHEATH и межпланетных проявлений корональных выбросов масс EJECTA. Во время медленных потоков SLOW происходило большинство (~67%) «полярных» суббурь, при этом они иногда наблюдались также в начале или в конце высокоскоростного потока FAST, когда скорость солнечного ветра еще или уже не достигла высоких значений. Кроме того, «полярные» суббури были зарегистрированы во время SHEATH и EJECTA, но только в том случае, если они происходили на фоне медленного потока солнечного ветра (~19%). Утренние «полярные» суббури также, как и вечерние, наблюдались при медленных потоках солнечного ветра SLOW и во время областей SHEATH, CIR и EJECTA с небольшой скоростью. Таким образом, разные типы магнитных суббурь на Земле связаны с появлением различных типов потоков солнечного ветра.

ДИНАМИКА МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ГЕОМАГНИТНЫХ ИНДЕКСОВ В ПЕРИОДЫ МАГНИТНЫХ БУРЬ, ИНИЦИИРОВАННЫХ РАЗНЫМИ ТИПАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Л.А. Дремухина¹, Ю.И. Ермолаев², И.Г. Лодкина²

¹ИЗМИРАН, г. Москва, (Троицк), dremukh@izmiran.ru

²ИКИ РАН, г. Москва

В работе на базе архива данных OMNI2 за 1995-2017 гг. анализируется динамика средних значений основных индексов геомагнитной активности и межпланетных параметров для периодов магнитных бурь с минимальными $Dst_{min} \leq -50$, инициированных разными межпланетными источниками: коротящими областями взаимодействия разно-скоростных потоков CIR, областями сжатия Sheath перед межпланетными CME, магнитными облаками MC и «поршнями» Ejecta. Для анализа была отобрана 181 изолированная, с монотонным ходом главных фаз (ГФ), буря. Из-за небольшой статистики таких бурь не проводились учет наличия ударной волны перед Sheath- и CIR-событиями и разделение на Sheath перед MC и Ejecta. Аналогично исследованиям [1, 2], которые основывались на базе данных OMNI за 1976-2000 гг., к выбранным бурям был применен двойной метод наложенных эпох, в котором двумя опорными моментами считались время начала ГФ и время Dst_{min} . Все бури были «приведены» к одинаковой средней длительности ГФ сжатием или растяжением для бурь с длительностью ГФ, соответственно, короче или длиннее выбранной средней. Анализ показал, что самые высокие средние значения индексов Dst , Ap , AE и PC , характеризующих разные широтные зоны земной поверхности, имеют место для магнитных бурь, вызванных Sheath-событиями, а самые низкие – для Ejecta-индуцированных бурь. Динамика средних значений геомагнитных индексов для бурь с разными источниками приблизительно одинакова: полярный индекс PC возрастает с началом ГФ и достигает максимума за 2-4 часа до ее окончания; авроральный индекс AE ведет себя аналогично PC ; максимум среднеширотного индекса Ap совпадает со временем Dst_{min} для MC- и Ejecta-индуцированных бурь, в то время как для остальных событий он достигается на 1-2 часа раньше. Распределения средних значений геоэффективных межпланетных параметров в течение ГФ бурь аналогичны для событий Sheath и CIR, однако их значения для последних в полтора раза ниже. Для них характерны очень высокий уровень флуктуаций модуля и B_z составляющей ММП в течение всей ГФ, резкий скачок динамического давления P приблизительно через 2 часа после начала ГФ, обусловленный таким же резким скачком плотности солнечного ветра, с последующим резким падением. Для событий CIR и MC средние значения флуктуаций B и B_z ММП и P остаются на низком уровне в течение всей ГФ бури с незначительным повышением в начале ГФ для событий MC.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-02-00177a.

1. Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. // Космич. исслед. 2010. Т. 48. № 6. С. 499.

2. Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. // Космич. исслед. 2011. Т. 49. № 1. С. 24.

ОСОБЕННОСТИ ГЛОБАЛЬНОЙ ПОЛЯРНОЙ СУББУРИ В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

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

ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия; ИФЗ РАН, ИКИ РАН, г. Москва, Россия

gromova@izmiran.ru

В глубоком минимуме 23 цикла солнечной активности, 22 июля 2009 года в 09-10 UT, наблюдалась глобальная полярная суббурия, которая была зарегистрирована при значительных положительной V_z и отрицательной V_y компонентах ММП. Ранее нами было показано, что такие условия типичны для появления исключительно дневных или исключительно ночных полярных геомагнитных возмущений. Впервые суббурия, развивающаяся вблизи границы аврорального овала, наблюдалась в глобальном масштабе, т.е. одновременно в высоких широтах всех секторов местного времени. По данным наземных геомагнитных наблюдений глобальной сети SuperMag и детально исследованном распределении высокоширотных околоравнинных геомагнитных возмущений по данным скандинавского профиля магнетометров IMAGE выявлена их пространственно-временная динамика возмущений. Показано, что в дневном секторе магнитные возмущения со временем перемещались к северу, а в ночном – к северо-востоку. При этом магнитные возмущения были более интенсивными в ночном секторе и наблюдались с максимальной амплитудой в авроральных широтах. Максимум дневных возмущений отмечался в более высоких, полярных, широтах. Спутниками DMSP было зарегистрировано усиление высыпания электронов над обсуждаемыми областями. Предполагается, что развитие необычной глобальной полярной суббурии вызвано уникальной ситуацией, сложившейся в результате предшествующего ей сильного сжатия магнитосферы динамическим давлением солнечного ветра (до 12 нПа) на фоне большого южного ММП.

УСТОЙЧИВОСТЬ НИЗКОШИРОТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ МАГНИТОСФЕРНОГО ХВОСТА

Козлов Д.А., Леонович А.С.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, kozlov-da@iszf.irk.ru

Численно решена задача об устойчивости низкоширотного пограничного слоя геомагнитного хвоста. Для моделирования рассматриваемой области используется модель плазменного цилиндра, обтекаемого винтовым потоком солнечного ветра, со сдвиговым слоем конечной толщины.

Показано, что в такой плазменной системе существуют неустойчивые МГД-волны трех видов: 1) поверхностные волны на магнитопаузе, 2) волны, излучаемые в солнечный ветер, и 3) собственные моды волновода в геомагнитном хвосте. Наибольший инкремент имеют неустойчивые поверхностные волны, сгенерированные в медленном солнечном ветре (200-400 км/с). Они раскачиваются на частотах, охватывающих диапазоны геомагнитных пульсаций от Pc3 до Pc6 (частота $f < 40$ мГц) включительно, и имеют локальный максимум на частотах геомагнитных пульсаций Pc4 ($f \approx 20$ мГц). Минимальные поперечные длины волн, которые неустойчивы в рассматриваемой цилиндрической модели геомагнитного хвоста, на порядок меньше характерной толщины переходного слоя.

В высокоскоростных потоках (800 км/с) солнечного ветра магнитопауза устойчива к раскачке на ней поверхностных волн, но неустойчива при возбуждении излучательных мод колебаний. Величина инкремента таких колебаний на порядок меньше, чем у поверхностных волн, генерируемых в медленных и среднескоростных потоках солнечного ветра. При малой закрученности обтекающего магнитосферу высокоскоростного потока колебания неустойчивы в диапазонах геомагнитных пульсаций от Pc4 до Pc6, а максимум их инкремента находится в частотном диапазоне Pc5 ($f \approx 10$ мГц). Если закрученность высокоскоростного потока, обтекающего магнитосферу, достаточно велика, то колебания неустойчивы во всем частотном диапазоне геомагнитных пульсаций от Pc1 до Pc6.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-17-00021).

АЛЬФВЕНОВСКИЕ ВОЛНЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕННЫХ ТРУБКАХ

Козлов Д.А., Леонович А.С.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, kozlov-da@iszf.irk.ru

В работе исследовано пространственно-временное распределение поля альфвеновских колебаний, возбуждаемых при взаимодействии плазменных трубок с фронтом ударной волны. В процессе такого взаимодействия на границе плазменной трубки возникают локализованные импульсы быстрых магнитозвуковых (БМЗ) колебаний, вытянутые вдоль линий пересечения фронта ударной волны с границей трубки. Эти импульсы движутся вдоль границы цилиндра вместе с фронтом ударной волны. БМЗ-колебания, проникая внутрь трубки, возбуждают альфвеновские волны на резонансных магнитных оболочках. Поляризация резонансных альфвеновских волн зависит от точки их наблюдения и меняется со временем.

Проведен расчёт динамики поля резонансных альфвеновских волн, применительно к процессу взаимодействия плазмосферы Земли с межпланетной ударной волной. Использована модель приэкваториальной области магнитосферы в виде цилиндрической плазменной трубки. Проведенные расчеты показали, что взаимодействие плазмосферы с фронтом межпланетной ударной волны может приводить к генерации полоидальных альфвеновских волн. Особенностью таких волн является то, что они возбуждаются в процессе альфвеновского резонанса, а не в результате развития неустойчивостей, связанных с потоками высокоэнергичных частиц.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований СО РАН П.16.

ПРЕДВЕСТНИК ВНЕЗАПНЫХ НАЧАЛ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ 0.2 – 11 ГЦ.

Пархомов В.А.¹, Яхнин А.Г.², Довбня Б.В.³, Бородкова Н.Л.⁴, Хомутов С.Ю.⁵, Т. Райта⁶, Рахматулин Р.А.⁷, Чиликин В.Э.⁸

1. Байкальский государственный университет, Иркутск, pekines_41@mail.ru

2. Полярный геофизический институт, Апатиты.

3. Обсерватория Борок, ИФЗ РАН.

4. Институт космических исследований РАН, Москва.

5. Институт космофизических исследований и распространения радиоволн, ДВО РАН, Паратунка, Камчатский край

6. Геофизическая обсерватория Соданкюля, Финляндия

7. Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

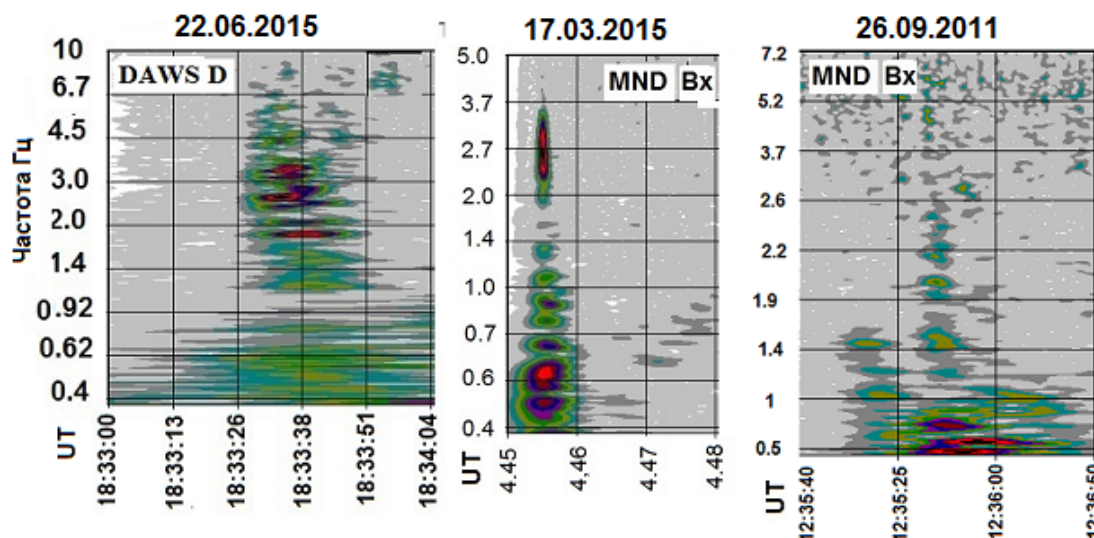
8. Байкальский государственный университет, Иркутск

Представлены результаты исследования взаимодействия с магнитосферой 30 межпланетных ударных волн за период 2011 – 2016 годы. Обнаружено два типа откликов в зависимости от скорости и давления солнечного ветра на фронте МУВ. В 20 случаях SSC, вызванных взаимодействием с МУВ со скоростями < 500 км/с и скачками давления < 10 нПа регистрировались геомагнитные пульсации Psc 1-5, свойства которых не отличались от опубликованных в различных источниках.

В случаях SSC, инициированных МУВ со скоростями фронта > 500 км/с и скачками давления на фронте > 10 нПа наблюдались всплески геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2 ÷ 11 Гц длительностью 3 ÷ 40 секунд. Всплески наблюдались глобально и имели подобные характеристики на обсерваториях, разнесённых по широте и долготе. На спектрограммах всплески имеют резонансную структуру – гребнеобразное распределение мощности в спектрах всплесков. Предполагается, что резонансная структура спектров может быть связана с прохождением волн, генерированных на границе магнитосферы через ионосферный альфвеновский резонатор. Показано, что всплески наблюдались перед резким возрастанием H – компоненты геомагнитного поля и могут быть названы предвестниками SSC.

Выявлено три вида всплесков по характеру изменения частоты: без изменения частоты, с падением частоты к концу всплеска и всплески с сочетанием падения и неизменной частотой (Рисунок).

Анализ рассмотренных событий показывает, что в случаях сжатия магнитосферы при взаимодействии с МУВ с резким фронтом и большими скачками параметров плазмы на фронтах первым признаком такого взаимодействия может быть не сам внезапный импульс магнитного поля, а широкополосный всплеск геомагнитных пульсаций в герцовом диапазоне.



**ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ
ЗЕМЛИ В УСЛОВИЯХ 24 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ПОЛЯРНОЙ ОРБИТЕ**

Анашин В.С., Протопопов Г.А., Балыкина Н.В., Бондарев Е.А., Репин А.Ю., Денисова В.И., Цургаев А.В.

*Филиал АО «ОРКК» - «НИИ КП», г. Москва, Россия, Protopopov_GA@orkkniikp.ru
ФГБУ «ИПГ», г. Москва, Россия*

В докладе представлены результаты анализа полетных данных во время 24 летнего цикла солнечной активности в виде потоков электронов с различными энергиями, измеряемые детекторами на борту космического аппарата, функционирующего на полярной орбите. Детекторы регистрируют протоны с энергией от 15 МэВ и электроны с энергией от 0.7 МэВ и протоны с энергией от 25 МэВ и электроны с энергией от 1.5 МэВ [1]. По полученным бортовым измерениям определены годовые спектры электронов естественных радиационных поясов Земли на полярной орбите.

По полученным данным были построены зависимости потоков заряженных частиц от номера L-оболочки и отношения интенсивностей магнитного поля B/B_0 , иллюстрирующие распределение потоков протонов и электронов в пространстве и по энергиям.

В докладе также представляются результаты анализа вариации потоков электронов и корреляции данных вариаций с уровнем геомагнитной активности [2] за разные года, и с уровнем солнечной активности. Наблюдались значительные (в 2,5 раза) вариации средних значений потоков электронов.

1. <http://ipg.geospace.ru/meteor-data.html>

2 <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/index.html>

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ РАЗНЫХ ПОТЕНЦИАЛАХ СПУТНИКА ИНТЕРБОЛ-2 НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОТОЭМИССИИ

Н.Ф.Смирнова¹, Г.Станев²

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

²ИКИТ БАН, г. София, Болгария, gstanev@space.bas.bg

А. Педерсен и его коллеги предложили определять концентрацию окружающей плазмы в магнитосфере на основе измерений потенциала датчиками электрических полей. Это возможно, если потенциал спутника положительный относительно потенциала плазмы, и используется то, что в этом случае баланс токов осуществляется только между электронным током и фототоком. Этот метод был апробирован на многих космических аппаратах. Если спутник использовать как зонд для измерения плотности (density probe), то появляется возможность зарегистрировать быстрые флуктуации плазмы. Недавно опубликована работа [1], в которой на основе данных миссии MMS (Magnetospheric Multiscale Mission) показано, что при большой волновой активности потенциал спутника может возрасти, и определение плотности на его основе может привести к физически неверным результатам.

Согласно методу А. Педерсена потенциал измеряется только датчиком электрических полей. На спутнике *ИНТЕРБОЛ-2* потенциал измерялся датчиком электрических полей ИЭСП-2, а также другим зондовым прибором, датчиком электронной температуры КМ-7. Сопоставление одновременных измерений потенциала *ИНТЕРБОЛ-2* относительно плазмы приборами ИЭСП-2 и КМ-7 позволяет оценить плотность фотоэлектронного тока по методике, предложенной ранее авторами этого доклада [2], а также определить концентрацию электронов на основе этой оценки. Измерения потенциала проводятся прибором ИЭСП-2 с частотой опроса 400 мс при помощи телеметрии СТО на ~350 участках орбит. Потенциал спутника (корпуса) V_s определялся как среднее значение измерений разности потенциалов E_{y1} и E_{y2} между спутником и сферическими зондами $Y1$ и $Y2$ на концах штанги Y в плоскости вращения спутника. Потенциал *ИНТЕРБОЛ-2* в авроральной зоне магнитосферы на высотах 2 - 3 R_E в основном положительный и в ~75% случаев находится в интервале от +2 до +5 В. Для определения концентрации электронов используются только измерения, для которых выполняется $\text{abs}(E_{y1} - E_{y2}) < 0,5$ В. т.е. составляющая электрического поля $E_y < 20$ мВм⁻¹ (длина штанги 25 м). Для проведения статистического анализа были построены гистограммы результатов измерений прибором ИЭСП-2 $\text{abs}(E_{y1} - E_{y2})$ при различных значениях потенциала спутника. Для построения всех гистограмм использовались только измерения с корректным током смещения $I_b = -72$ нА или $I_b = -110$ нА, которые составляют ~70% от общего числа измерений. Вывод о правильном выборе тока смещения был сделан на основе сопоставления одновременных измерений потенциала спутника приборами ИЭСП-2 и КМ-7. Гистограммы демонстрируют возрастание поперечного электрического поля в Y -направлении с увеличением потенциала спутника, но для большинства измерений выполняется условие $\text{abs}(E_{y1} - E_{y2}) < 0,5$ В. Если $V_s < 6$ В, то этом случае для 80% ($I_b = -72$ нА) и 79,5% ($I_b = -110$ нА) измерений выполняется условие $\text{abs}(E_{y1} - E_{y2}) < 0,5$ В. Гистограмма значений $\text{abs}(E_{y1} - E_{y2})$ для всех результатов измерения потенциала прибором ИЭСП-2 показывает, что такие измерения составляют 76,5% ($I_b = -72$ нА) и 74,8% ($I_b = -110$ нА). В докладе приводится возможное объяснение увеличения $\text{abs}(E_{y1} - E_{y2})$ с возрастанием потенциала спутника, а также подробности статистического анализа и примеры оценки концентрации электронов на основе одновременных измерений потенциала спутника двумя приборами ИЭСП-2 и КМ-7.

1. Graham D.B., Vaivads A., Khotyaintsev Yu.V. et al. //2018, *JGR*, doi: 10.1029/2018JA025874
2. Smirnova N.F. and G. Stanev //Geomagnetism and Aeronomy, 2009, V.49, pp. 1204-1207

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА
ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ КА “GOES”
С 1995 Г. ПО 2009 Г.**

Смолин С.В.

Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия, smolinsv@inbox.ru

Используются наблюдения потоков релятивистских (> 2 МэВ) электронов, усредненные по местному часу вдоль геосинхронной (геостационарной) орбиты (ГСО) с 1995 г. по 2009 г., собранные космическим аппаратом (КА) «GOES». Распределение потоков по местному времени (local time) LT имеет пик около полудня (между 1100 и 1200 LT) и виден его минимум около полночи (между 2300 и 2400 LT). Как аналитическое описание предлагаются простые формулы для определения перпендикулярного (для питч-угла 90 градусов) дифференциального потока и интегрального потока релятивистских электронов с энергией больше 2 МэВ на ГСО, которые зависят от LT, параметра МакИлвейна L , индекса геомагнитной активности K_p и перпендикулярного дифференциального потока или интегрального потока релятивистских (> 2 МэВ) электронов, взятых для $LT = 0$ ч.. Эти формулы могут быть рассмотрены как первые приближения для перпендикулярных (дифференциальных) интегральных потоков на геосинхронной (геостационарной) орбите. Сделано сравнение аналитической зависимости для перпендикулярного интегрального потока релятивистских электронов с энергией больше 2 МэВ с усредненными экспериментальными данными КА «GOES» на геосинхронной орбите Земли. Получено очень хорошее согласие. Для всего диапазона от 0000 до 2400 LT вдоль ГСО величина эффективности предсказания (prediction efficiency) точности предложенной модели получена $PE = 0,963$. А для диапазонов от 0000 до 1100 LT и от 1800 до 2400 LT величина эффективности предсказания еще больше $PE = 0,987$.

Получена аналитическая формула для определения модельного (прогнозируемого) отношения максимального интегрального потока (в полдень) к минимальному интегральному потоку (в полночь) в нелинейной зависимости от K_p индекса геомагнитной активности ($0 \leq K_p < 10$) с максимумом отношения потоков в 20,37 раза при $K_p = 8$. Эта же формула позволяет на сутки вперед прогнозировать (предсказывать) в будущий полдень максимальный (интегральный или дифференциальный) поток релятивистских электронов на ГСО, если известен поток в полночь и примерно в течение одних суток $K_p = \text{const}$ или $K_p \approx \text{const}$. Предсказанному нелинейному эффекту требуется проверка экспериментальными данными. Смолин С. В. Моделирование потока релятивистских электронов на геостационарной орбите в магнитосфере Земли // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2018. № 2. С. 75-85. doi: 10.17238/issn2226-8812.2018.2.75-85.

**ВАРИАЦИИ СПЕКТРОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ
МАГНИТНОЙ БУРИ 19-22 ДЕКАБРЯ 2015 г.**

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

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

²*Институт Космических Исследований РАН*

sotnikov.nikita@hotmail.com

Выяснение механизмов ускорения релятивистских электронов внешнего радиационного пояса входит в число основных задач физики магнитосферы. Подходы к решению данной задачи сильно изменились в результате исследований положения границы захвата электронов с энергией >100 кэВ относительно аврорального овала [Riazaantsevaetal., 2018, <https://doi.org/10.5194/angeo-36-1131-2018>], так как по данным измерений в проекте МЕТЕОР было показано, что полярная граница внешнего радиационного пояса в большинстве случаев локализована внутри аврорального овала. Ранее в результате статистического сопоставления определяемого по спутниковым данным положения границы захвата и наземных наблюдений овала считалось, что внешняя граница радиационного пояса совпадает с экваториальной границей овала. Анализ положения внешней границы радиационного пояса относительно аврорального овала во время магнитной бури 19-22 декабря 2015 г. [Сотников и др., Геом. Аэрон., 2019, № 2] показал, что полярная граница радиационного пояса во время бури может совпадать с полярной границей овала, что указывает на определяющую роль авроральных процессов в ускорении частиц внешнего пояса. Магнитная буря 19-22 декабря 2015 г. привела к мощному возрастанию потоков релятивистских электронов. Проведен анализ процессов ускорения во время данной бури с использованием результатов наблюдений прибора ECT-REPT в проекте RBSP/VanAllen вблизи максимума вновь формирующегося пояса. Рассмотрены изменения наклонов спектров и пич-угловых распределений в результате развития отдельных суббурь во время бури. Предварительные результаты свидетельствуют в пользу эффективного ускорения частиц на сравнительно коротких временных масштабах (<6 часов), что трудно объяснить в рамках ускорения электронов хоровыми излучениями (при наблюдаемых амплитудах волн требуется $\sim$ суток).

ДИНАМИКА КОЛЬЦЕВОГО ТОКА И ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОННОГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ В ФЕВРАЛЕ 2014 г.

Власова Н.А.¹, Калегаев В.В.¹, Назарков И.С.¹, Prost A.², Шустова А.Н.³

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

2. ISAE-SUPAERO, Toulouse, France

*3. Физический факультет Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

nav19iv@gmail.com

Представлены результаты исследования динамики потоков релятивистских электронов в радиационных поясах Земли в феврале 2014 г. по экспериментальным данным, полученным в сердцевине радиационных поясов КА Van Allen Probes (первоначально RBSP - Radiation Belt Storm Probes), на геостационарной орбите ИСЗ Электро-Л1 и GOES, на низкой полярной орбите ИСЗ Метеор-М2 и POES. Проведен сравнительный анализ вариаций потоков релятивистских электронов и параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. В качестве показателя геомагнитной активности использовались Dst-вариация и AL-индекс. Рассмотрены четыре интервала: 16-17, 19-21, 23-24 и 27-28 февраля 2014, в течение которых наблюдались значительные вариации внешнего радиационного пояса, связанные с изменениями магнитосферного поля в ответ на меняющиеся условия в межпланетной среде. Изменения двух популяций частиц определяют состояние магнитосферы: вариации потоков ионов кольцевого тока и энергичных электронов внешнего радиационного пояса. Развитие и распад кольцевого тока происходят, как в ответ на изменение условий в межпланетной среде, так и в связи с внутримангнитосферными процессами (мангнитосферные суббури, волновая активность), также зависящими от условий в солнечном ветре и от межпланетного магнитного поля. Вариации кольцевого тока приводят к изменениям магнитного поля внутри области захвата энергичных электронов внешнего радиационного пояса, что существенным образом сказывается на динамике потоков электронов. Анализ данных измерений потоков энергичных электронов в приэкваториальной области и на низких орбитах позволяет проследить эволюцию радиационного пояса во время геомагнитных возмущений разной мощности и оценить роль адиабатических и неадиабатических процессов в регистрируемых геостационарными спутниками вариациях. Сопоставление данных, полученных на разных орбитах, позволяет сделать выводы о том, что, во-первых, динамика потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите не отражает в полной мере динамику потоков электронов во всей области радиационных поясов; во-вторых, Vz-компонента (ее величина и направление) межпланетного магнитного поля наряду со скоростью солнечного ветра является ключевым фактором в динамике потоков релятивистских электронов.

**ДАВЛЕНИЕ ПЛАЗМЫ ПОД МАГНИТОПАУЗОЙ И ТОКИ ВНУТРИ
МАГНИТОСФЕРЫ**

С.С. Знаткова¹, Е.Е. Антонова^{1,2}, И.П. Кирпичев², М.С. Пулинец¹

1 - НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

2- ИКИ РАН, г. Москва, Россия

svetlana.znatkova@yandex.ru

Анализ распределения давления плазмы под магнитопаузой представляет большой интерес, так как позволяет определять конфигурацию магнитосферных токовых систем в предположении соблюдения условия магнитостатического равновесия. В соответствии с этим условием при изотропии давления оно постоянно как на магнитной силовой линии, так и на линии тока. Последнее условие позволяет определить геоцентрическое расстояние, на котором отходящая от магнитопаузы линия тока пересекает полуночный меридиан. Особенно интересны области под магнитопаузой, где происходит переход от линий кольцевого тока к линиям тока хвоста. Исследуются пересечения магнитопаузы спутниками THEMIS. Проведен анализ пересечений магнитопаузы в условиях баланса давлений. Получены оценки геоцентрических расстояний, на которых отходящие от магнитопаузы линии тока пересекают полуночный меридиан для конкретных событий.

ВОПРОСЫ ЗАРЯДКИ ПОГЛОЩАЮЩЕГО СФЕРИЧЕСКОГО ТЕЛА В ПЛАЗМЕ С МАКСВЕЛЛОВСКИМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Красовский В. Л., Киселёв А. А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, aleksandr.kiselyov@gmail.com

Изучение возмущения бесстолкновительной плазмы вокруг поглощающего заряд сферического тела – известная, но не до конца изученная задача теории электрического зонда. Длительное время оставался открытым вопрос об определении параметров захваченных частиц – движущихся по финитной траектории – и оценке их вклада в экранирование заряженного тела.

В начальный момент в бесстолкновительной плазме с максвелловским начальным распределением плазмы возникает сферическое поглощающее заряд тело. Далее рассматривается задача с начальными условиями, описываемая системой уравнений Власова-Пуассона. Целью является изучение динамики плазмы и процесса приобретения заряда сферой вплоть до асимптотического состояния устойчивого равновесия. Для рассматриваемой задачи характерны значительная нелинейность и невозможность задания граничных условий для захваченных частиц без проведения полного решения, что крайне осложняет и ограничивает аналитическое рассмотрение. Поэтому был разработан код для численного моделирования этой системы методом «частиц-в-ячейке», часто успешно применяемым в сильно нелинейных плазменных задачах. Использование канонических уравнений движения и сферической симметрии задачи позволило значительно повысить скорость расчета и упростить выкладки.

Были проведены расчеты для набора параметров физической системы. Проанализированы пространственно-временные зависимости электрического поля при выбранных параметрах при переходе системы в состояние асимптотического равновесия. Проведено сравнение электродинамических характеристик системы при максвелловской начальной функции распределения с предыдущими результатами, полученными для моноэнергетической функции распределения. Для одного из расчетов найдена функция распределения захваченных и пролетных частиц плазмы. Вклад захваченных частиц был оценен с помощью отношения заряда сферы к суммарному заряду захваченных частиц (относительный заряд). Обнаружена зависимость максимума величины относительного заряда от скейлингового параметра, характеризующего близость сгустка захваченных частиц к поверхности сферы.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ВОЗМУЩЕНИЙ МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ЕЕ ЛОКАЛЬНОМ ВЧ-
НАГРЕВЕ НА КРУПНОМАСШТАБНОМ СТЕНДЕ «КРОТ»**

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

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

Исследование динамики плазменных неоднородностей представляет существенный интерес для построения моделей естественных геофизических процессов, а также для интерпретации результатов активных экспериментов, которые осуществляются в ионосфере и магнитосфере Земли. В частности, искусственные плазменные неоднородности различных масштабов могут формироваться при нагреве ионосферной плазмы мощным радиоизлучением, при инъекции плазменных струй и бариевых облаков с борта космических аппаратов. Вытянутые вдоль геомагнитного поля плазменные неоднородности образуют искусственную ионосферную турбулентность (ИИТ), возбуждаемую под действием излучения нагревных стендов, таких как HAARP, EISCAT и СУРА [1-4], СДВ станций и мощных спутниковых передатчиков.

В данном докладе представлены результаты лабораторных экспериментов, которые проводились на уникальном крупномасштабном стенде «Крот» (ИПФ РАН, г. Н. Новгород). В экспериментах изучена динамика узких плазменных неоднородностей, вытянутых вдоль внешнего магнитного поля, которые развиваются под действием нагревного ВЧ импульса. Специальный подбор параметров позволил в лабораторном эксперименте продемонстрировать быстрый, так называемый «униполярный» режим переноса плазмы, который сопровождается возбуждением вихревых электрических токов. Динамика возмущений плотности плазмы исследовалась с помощью зонда с СВЧ-резонатором [5,6]. Структура параллельных электронных токов при развитии неоднородностей восстанавливалась из измерений магнитными зондами, динамика ионов оценивалась по изменениям профиля плотности плазмы. Показано, что ионы, которые могут двигаться поперек магнитного поля со скоростью несколько меньшей скорости ионного звука, могут замыкать токовую систему, которая обусловлена уходом электронов из области нагрева вдоль внешнего магнитного поля [6]. Такой режим эволюции неоднородностей плазмы обсуждается в докладе применительно как к результатам более ранних экспериментальных исследований, так и к активным ионосферным экспериментам. Кроме того, продемонстрировано взаимодействие нескольких одновременно развивающихся тепловых плазменных неоднородностей через токи униполярного переноса.

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

1. Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E., Parrot M., Galkin I., Reinisch B., Huba J., Joyce G., Papadopoulos K. // J. Geophys. Res. 2012. V. **117**. P. A10307.
2. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K., Rietveld M.T., Ivanova I.M., Baddeley L.J. // Geophys. Res. Lett. 2011. V. **38**. P. L08802.
3. Frolov V.L., Bolotin I.A., Komrakov G.P., Glukhov Y.V., Andreeva E.S., Kunitsyn V.E., Kurbatov G.A. // Heliogeophys. Res. 2015. V. **13**. P. 49.
4. Grach S.M., Sergeev E.N., Mishin E.V., Shindin A.V. // Phys. Usp. 2016. V. **59**. P. 1091.
5. Aidakina N., Gushchin M., Zudin I., Korobkov S., Strikovskiy A. // Physics of Plasmas. 2018. V. **25**. P. 072114.
6. Aidakina N., Gushchin M., Zudin I., Korobkov S., Strikovskiy A. // Physics of Plasmas. 2018. V. **25**. P. 122104.

ДИФФУЗИОННЫЕ И ДИАМАГНИТНЫЕ ОБЛАСТИ В СЛАБОЗАМАГНИЧЕННОЙ ГОРЯЧЕЙ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ В ЭЛЕКТРОННОМ КИНЕТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ

В.М. Губченко

ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия (ua3thw@appl.sci-nnov.ru)

Электронные диффузионные и диамагнитные токонесущие области пересоединения и разрыва силовых линий формируются в результате разлетов плазмы поперек магнитного поля. Такие области характеризуются слабой замагниченностью электронов и ионов, а их магнитные поля определяются комбинацией возбуждаемых в ней индукционных резистивных (связанных с ускорением частиц; для диффузионной области) и поляризационных (связанных с магнитной проницаемостью; для диамагнитного облака) токов. В основе формирования областей медленный электромагнитный индукционный процесс, происходящий в горячей бесстолкновительной плазме высокого давления в закритическом режиме, локализованный внутри резонансной линии поглощения плазмы на «нулевой» частоте, поэтому требуется кинетическое описание полей с учетом формы функции распределения частиц (ФРЧ) плазмы. В зависимости от формы ФРЧ плазма внутри линии ведет себя и как проводник/резистор при асимметрии ФРЧ (поток), и как магнетик (диамагнетик, парамагнетик) при анизотропии ФРЧ (температурная, от взаимопроникающих потоков и ток). Эти свойства определяются величиной интегрального параметра ФРЧ - электромагнитной добротностью плазмы G_V и его модификацией замагниченностью - параметром Γ_V . В рамках линейного приближения получены Фурье-образы и соответствующие стационарные трехмерные структуры полей с силовой и бессиловой компонентами в ее составе, определяемые через индуцированные кинетические масштабы пространственной дисперсии потока плазмы. Проведено интегральное по координатному пространству описание квадратичных форм полей. Это импедансное описание, которое характеризует интегральную мощность электромагнитных процессов в нормировке на силу электрического тока и Э.Д.С. в области. Импеданс представляет магнитную область электротехнической схемой, в которой вычислены в кинетике импедансные «горячие» RCL параметры. «Горячие» импедансы характеризуют энергетику ускорения частиц (R) в области, а также накопление реактивной магнитной энергии (L) и определяют характерные времена при импульсных выбросах и колебаниях как на макро-(космических), так и микро-(лазерных) масштабах. Измерение параметров RCL рамок основа для диагностики добротности потока G_V . В двумерном описании рассмотрена область формирования магнитных структур: островов и магнитных жгутов - электромагнитная линейная неустойчивость прижатых мод на фоне нелинейного одномерного стационарного токового слоя, сопряженного с потоком. Дано одномерное нелинейное кинетическое описание крупномасштабной силовой динамики горячей токонесущей плазмы в области в релаксационном (резистивном) режиме, связанном с ускорением электронов индукционным полем, что отлично от известного в литературе описания безускорительных диамагнитных колебательных режимов анизотропной плазмы в бессиловой электронной гидродинамике.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0035-2014-0029, частично поддержана грантами РФФИ (№. 19_02_00704, № 17_02_00091), Министерством образования и науки РФ в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы" субсидия #14.607.21.0196, УИН проекта RFMEFI60717X0196, программой № 28 Президиума РАН (проект I.14 "Ускорение заряженных частиц и волновые процессы в солнечной, гелиосферной и магнитосферной плазме").

МГД УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Кузнецов В.Д., Осин А.И.

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

Анализируются решения для ударных волн применительно к условиям в солнечном ветре, полученные в рамках 8-моментного приближения для МГД описания бесстолкновительной плазмы. Определены области параметров плазмы до ударной волны, соответствующие волнам сжатия и разряжения, областям неустойчивости плазмы за фронтом ударной волны, а также разным направлениям тепловых потоков за фронтом ударной волны. Обсуждается эволюционность ударных волн в плазме, скорость линейных волн в которой зависит от величины и направления тепловых потоков.

1. Kuznetsov V.D., Osin A.I. // Phys. Lett. A 2018. V. **382**. P. 2052-2054.

**КОРРЕКТНОЕ КИНЕТИЧЕСКОЕ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ
ЗАМАГНИЧЕННОЙ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ С УЧЕТОМ
ПРОДОЛЬНОГО СИЛОВОГО РАВНОВЕСИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ИСПРАВЛЕНИЕ
ОШИБКИ В СИСТЕМЕ УРАВНЕНИЙ ЧУ-ГОЛЬДБЕРГЕРА-ЛОУ**

**О.В. Мингалев¹, И.В. Мингалев¹, Х.В. Малова^{2,3}, А.М. Мерзлый³, В.С. Мингалев¹,
О.В. Хабарова⁴**

¹ Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты, mingalev_o@pgia.ru

² Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва

³ Институт космических исследований РАН, Москва

⁴ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.
Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия

В работе показано, что при выводе системы уравнений Чу-Гольдбергера-Лоу (ЧГЛ) в уравнении для продольного давления имеется ошибка, и получен правильный вид этого уравнения. Также выводится система уравнений для определения магнитного и электрического полей в замагниченной бесстолкновительной плазме. Эта система замыкает как систему уравнений Власова в дрейфовом приближении, так и правильную систему многокомпонентной магнитной газовой динамики, состоящую для каждой компоненты плазмы из системы уравнений ЧГЛ с исправленным уравнением для продольного давления.

Полученная система уравнений для полей имеет эллиптический тип, не содержит частных производных по времени и определяет поля в области моделирования в приближении мгновенного дальнего действия по текущему распределению гидродинамических переменных каждой компоненты плазмы и граничным условиям с учетом силового равновесия электронов вдоль линий магнитного поля. В этой системе уравнений магнитное поле определяется уравнением Гаусса и уравнением Ампера, в котором плотность тока представлена по формуле дрейфовой теории как функция от магнитного поля, полной плотности продольного тока, а также полных продольного и поперечного давлений плазмы. Для соленоидальной части электрического поля выводится векторное уравнение Пуассона, в правой части которого стоит частная производная полного тока по времени, которая через обобщенный закон Ома представлена как функция от магнитного поля и гидродинамических переменных каждой компоненты плазмы. Потенциальная часть электрического поля определяется из условия силового равновесия электронов вдоль линий магнитного поля. Разработана схема итерационного процесса для численного решения как системы уравнений Власова в дрейфовом приближении, так и правильной системы многокомпонентной магнитной газовой динамики вместе с полученными уравнениями для полей.

Показано, что для плазмы магнитосферы и солнечного ветра нарушаются два главных предположения, на которых основан вывод уравнения магнитной гидродинамики: об отсутствии продольного электрического поля, а также о равенстве поперечной скорости плазмы скорости электрического дрейфа. Подстановка этих двух неверных предположений в уравнение Фарадея дает эволюционное уравнение индукции для магнитного поля, которое содержит частную производную по времени и имеет гиперболический тип. Определение магнитного поля из этого уравнения физически означает, что уравнение Ампера не учитывается, то есть текущие в плазме токи вообще никак не влияют на магнитное поле, поскольку из-за квазинейтральности вклад скорости электрического дрейфа в полный ток равен нулю. Это приводит к физически неверному описанию электромагнитного поля и движения плазмы, поскольку качественно меняется физическое описание магнитного поля — оно описывается эволюционным гиперболическим уравнением, что противоречит приближению мгновенного дальнего действия, которое равносильно отбрасыванию тока смещения.

Работа О.В., И.В. и В.С. Мингалевых выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-01-00100.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОЙ ДИНАМИКИ В СПЕКТРАХ СТИМУЛИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ В ЛАБОРАТОРНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

Викторов М.Е., Шалашов А.Г., Господчиков Е.Д., Мансфельд Д.А.

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

Обнаружена сложная динамика в спектрах стимулированного электронно-циклотронного излучения неравновесной плазмы, удерживаемой в компактной лабораторной магнитной ловушке открытого типа [Viktorov M.E. *et al.* // EPL, 2016, V.116, P.55001]. Особенностью данных спектров излучения является быстрый дрейф частоты внутри волновых пакетов, повторяющихся почти периодически. Подобные структуры плохо объясняются в рамках квазилинейного подхода, стандартного для описания генерации широкополосного излучения в плазме. С другой стороны, одновременное наблюдение нескольких волновых пакетов с дрейфом частоты в одном диапазоне является типичным при образовании самосогласованных нелинейных структур в фазовом пространстве вблизи резонансов волна-частица (модель Берка и Брейзмана [Berk H.L., Breizman B.N., Petviashvili N.V. // Phys. Lett. A, V.234, P.213, 1997]). Представленные результаты являются первым экспериментальным свидетельством возможности спонтанного формирования самосогласованных структур типа нелинейных волн Бернштейна-Грина-Крускала вблизи резонансов волна-частица в сверхвысокочастотном диапазоне частот в лабораторной плазме. В докладе обсуждаются различные факторы, которые оказывают влияние на вероятность возникновения всплесков излучения с чирпированным спектром, а также исследуется зависимость тонкой структуры спектра излучения от параметров экспериментов, проводится сопоставление с уже известными процессами в космической плазме.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 17-72-10288).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИСТЕМ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ И ПОНИЖЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВИСТОВЫХ ВОЛН

Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Гущин М.Е., Заборонкова Т.М., Коробков С.В.
ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Недавние спутниковые исследования подтвердили возможность генерации искусственных дактов плотности плазмы в результате нагрева ионосферы радиопередатчиками разных диапазонов частот [1,2]. Считается, что искусственные ионосферные дакты должны способствовать повышению эффективности выхода низкочастотных волн, возбуждаемых на поверхности Земли либо в атмосфере, в магнитосферу [2]. Таким образом, искусственные ионосферные дакты могут быть использованы для волновой диагностики и активного воздействия на околоземную плазму. В то же время, спутниковые измерения показывают сложную структуру ионосферных дактов, которые могут включать в себя множество вытянутых вдоль внешнего магнитного поля неоднородностей с поперечными размерами от десятков метров до нескольких километров. Таким образом, необходима разработка теории распространения низкочастотных волн вдоль ионосферных дактов, учитывающую их мелкомасштабную структуру. В настоящем докладе приводятся результаты двумерного численного моделирования распространения свистовых волн вдоль системы неоднородностей с пониженной, либо с повышенной концентрацией плазмы. Найдены и исследованы режимы, в которых система неоднородностей образует единую волноводную структуру. Выявлено два характерных режима распространения излучения вдоль таких структур. В первом случае волноводные свойства отдельных неоднородностей практически не проявляются, что позволяет заменить систему неоднородностей «эффективным» дактом со сглаженным профилем. Второй случай соответствует системе волноводов, между которыми перекачка энергии происходит за счет перекрытия мод подобно квантовомеханическому туннелированию. Для обоих режимов определены основные особенности структур электромагнитных полей и их пространственных спектров. Точные аналитические решения модельной задачи о распространении излучения вдоль отдельных неоднородностей позволяют сформулировать критерии реализации указанных режимов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-32-00721 мол_а)

[1] Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E., et. al. Artificial ducts caused by HF heating of the ionosphere by HAARP. J. Geophys. Res., 117, A10307 (2012)

[2] Rapoport V.O., Frolov V.L., Polyakov S.V., et. al. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility. J. Geophys. Res., 115, A10322 (2010)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ШУМОВ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ В КАВЕРНЕ ПЛОТНОСТИ МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЫ С ПРОДОЛЬНЫМ ТОКОМ

Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Гущин М.Е., Коробков С.В., Стриковский А.В.
ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Генерация широкополосных излучений в ионосфере и магнитосфере Земли связана с развитием разного рода неустойчивостей, обусловленных наличием в плазме популяции ускоренных заряженных частиц. Подобные эффекты наблюдаются и в лабораторных условиях [1,2]. В докладе приводятся предварительные результаты экспериментальных исследований электромагнитных шумов, возникающих в замагниченной плазме с продольным током. В экспериментах, проводимых на крупномасштабном стенде «Крот», в замагниченную плазму вводится электрод под высоким положительным потенциалом относительно стенки камеры. В результате сбора заряженных частиц электродом (коллектором) в плазме формируется вытянутая вдоль внешнего магнитного поля каверна пониженной концентрации с повышенной температурой электронов и интенсивным продольным током. Постановка эксперимента близка к описанной в работе [1]; новые эффекты удалось обнаружить благодаря пропусканию по плазме более сильных токов и использованию увеличенного на порядок внешнего магнитного поля. Зарегистрирована генерация широкополосного электромагнитного шума со спектром, перекрывающим весь свистовый диапазон частот. Шумы фиксируются только при протекании по плазме продольного тока, они исчезают при прерывании тока, что позволяет классифицировать обнаруженный эффект как токовую неустойчивость. Широкополосное излучение покидает область генерации в форме свистовых волн, которые распространяются преимущественно вдоль каверны, представляющей собой плазменный волновод. Обсуждается сходство свойств шумовых сигналов со свистовыми излучениями, обнаруженными в пучково-плазменных лабораторных экспериментах, а также с ионосферными и магнитосферными излучениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-02-01156 А).

- [1] J.M. Urrutia, R.L. Stenzel. Pulsed currents carried by whistlers. IX. In situ measurements of currents disrupted by plasma erosion. Phys. Plasmas, V. 4, No. 1, pp. 36-52 (1997)
- [2] M. Viktorov, D. Mansfeld, S. Golubev. Laboratory study of kinetic instabilities in a nonequilibrium mirror-confined plasma. EPL, V. 109, P. 65002 (2015) doi: 10.1209/0295-5075/109/65002

ЭЛЕКТРОН-ИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВЕЙБЕЛЯ И КВАЗИМАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ ФИЛАМЕНТЫ ТОКА В ЗВЁЗДНОМ ВЕТРЕ

Кочаровский В.В.¹, Бородачёв Л.В.², Коломиец Д.О.², Кочаровский В.В.^{1,3}, Нечаев А.А.¹

¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kochar@appl.sci-nnov.ru

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

³Dept. of Physics and Astronomy, Texas A&M Univ., College Station, USA

В солнечном и звездном ветрах ионы и электроны могут иметь сравнимые энергии и существенно анизотропные распределения по скоростям. В подобных условиях обе фракции бесстолкновительной плазмы способны вносить значительный вклад в развитие неустойчивости вейбелевского типа и в последующее формирование самосогласованных токовых структур и магнитных полей — квазимагнитостатической турбулентности.

В настоящей работе мы рассматриваем этот круг вопросов, до сих пор остававшихся открытыми, на основе численного исследования нелинейной стадии вейбелевской неустойчивости в двухкомпонентной плазме с сильной анизотропией температуры и равными начальными энергиями электронов и ионов [1, 2]. В компьютерных расчётах нами использовался PIC-код DARWIN [3, 4] в 5-мерном (2D3V) фазовом пространстве, построенный на основе безизлучательной модели динамики электромагнитных полей [5]. В расчетах исходно задавались максвелловские распределения частиц по каждой из проекций скорости, но с различными температурами вдоль и поперек оси z декартовых координат, причем большей являлась продольная температура.

Моделирование проводилось в плоскости, ортогональной оси z , так что развитие неустойчивости приводило к формированию филаментов тока вдоль этой оси (результаты расчетов представлены в [4]). Данное моделирование позволило исследовать долговременная эволюция квазистационарного магнитного поля и филаментов тока, создаваемых сначала электронной, а потом совместно электронной и ионной фракциями. В процессе своего насыщения и нелинейного, по степенному закону, затухания мелкомасштабные магнитные поля, созданные электронными токами вейбелевской неустойчивости, индуцируют токи ионов, определяющие долговременную медленную эволюцию крупномасштабных возмущений магнитного поля. При этом со временем электроны становятся изотропизованными и значительная их часть оказывается замагничена, что надолго замораживает эволюцию магнитных полей, исключая либо существенно задерживая ионную вейбелевскую неустойчивость, которая в противном случае могла бы развиваться за счет сохраняющейся долгое время анизотропии температур ионов.

С использованием проведенного анализа обсуждается возможность реализации данного сценария в солнечном и звездных ветрах и оцениваются ожидаемые для них параметры образующихся самосогласованных филаментов тока и скорость их эволюции. Обсуждается также влияние крупномасштабного (внешнего) магнитного поля на темп формирования и спектральные характеристики магнитостатической турбулентности.

Работа Бородачёва Л.В. и Коломийца Д.О. поддержана РФФИ (проект 16–01–00690).

1. Weibel E. S. // Phys. Rev. Lett. 1959. V. 2. P. 83.
2. Бородачев Л. В., Гарасёв М. А., Коломиец Д. О., Кочаровский В. В., Мартыанов В. Ю., Нечаев А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 12. С. 1107.
3. Borodachev L. V., Kolomiets D. O. // J. Plasma Physics. 2011. V. 77, Iss. 2. P. 277.
4. URL: <http://www.darwincode.ru/results/>
5. Бородачёв Л. В., Мингалев И. В., Мингалев О. В. Энциклопедия низкотемпературной плазмы Б. Т. 7. М.: Янус-К, 2008. С. 136.

ВЛИЯНИЕ ДЛИННОВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГЕНЕРАЦИЮ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Буринская Т.М., Шевелёв М.М.

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

Проведено исследование влияния длинноволновых возмущений магнитного поля, характерных для авроральной области Земли, на процессы генерации аврорального километрового излучения в узкой трехмерной плазменной каверне, в которой на фоне пониженной плотности холодной плазмы распространяется поток слаборелятивистских электронов. В приближении геометрической оптики с использованием развитого ранее численного подхода [1] проведено моделирование временной динамики распространения и усиления волн с начальными групповыми скоростями, направленными в область усиливающегося магнитного поля. Анализ полученных траекторий показал, что коэффициенты усиления волн зависят от величины градиента магнитного поля в области отражения. В случае, когда точка отражения волны находится в области, где градиент возмущенного магнитного поля меньше градиента невозмущенного дипольного поля, коэффициенты усиления волн превосходят по величине коэффициенты усиления волн, распространяющихся в невозмущенном поле, и наоборот. Таким образом, наличие длинноволновых возмущений дипольного магнитного поля, приводит к изменению формы спектра генерируемых волн и возможности формирования на нем участков, обладающих разной кривизной [2].

1. Буринская Т.М., Шевелёв М.М. // Геомагнетизм и аэрономия, 2017, Т. 57, №1, С. 19
2. Буринская Т.М., Шевелёв М.М. // Физика плазмы, 2018, Т. 44, № 11, С. 888

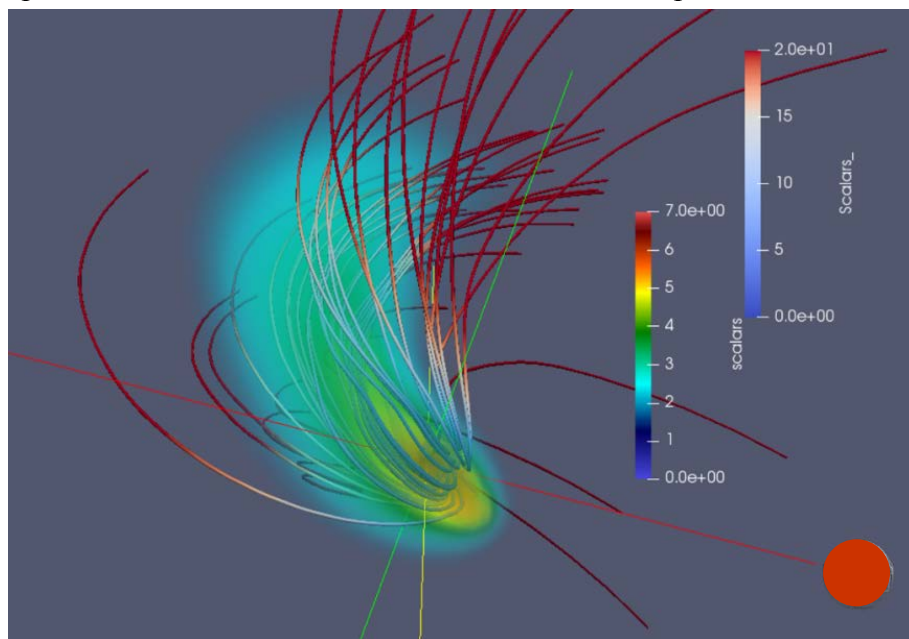
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАНЕТАРНОГО ВЕТРА ГОРЯЧИХ ЭКЗОПЛАНЕТ СО ЗВЕЗДНЫМ ВЕТРОМ И НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

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

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

*SRI, Graz, Austria; НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

Впервые реализовано 3-х мерное газодинамическое моделирование теплого Нептуна Gliese 436 b. В численной модели соединены плазмо-фотохимические процессы в верхней атмосфере на масштабах шкалы высот $\sim 10^3$ км [1-3] с глобальным взаимодействием истекающей атмосферы с потоком звездной плазмы в рамках всей системы $\sim 10^7$ км. Это позволило объяснить глубокое поглощение в линии Ly α в диапазоне скоростей 50-120 км/с, процессом перезарядки «быстрых» звездных протонов на «медленных» атомах истекающей атмосферы планеты. Динамические особенности такого транзитного поглощения – раннее начало и длительное продолжение – объясняются формированием головной ударной волны перед планетой и хвостом кометного типа за ней. Особенно глубокое поглощение, в середине транзита, объясняется наклоном плоскости орбиты планеты относительно наблюдателя.



Полученные результаты открывают уникальные и до сих пор недоступные возможности для количественной интерпретации наблюдаемого УФ поглощения во время транзитов экзопланет и детектирования параметров звёздного ветра и космической погоды вблизи других звезд.

Рисунок 1. Крупномасштабное облако атомарного водорода вокруг теплого Нептуна GJ 436 b (расположен в центре координат), сформированное в результате истечения верхней атмосферы планеты под воздействием ионизирующей радиации родительской звезды, красного карлика GJ 436, (красный кружок в масштабе). Расстояние от звезды до планеты составляет 4.35 млн. км. Линиями показаны траектории течение планетарного вещества. Цветовые шкалы показывают градации концентрации в логарифмической шкале от 10^0 до 10^7 см $^{-3}$ и скорости движения от 0 до 200 км/с.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0307-2017-0015, при частичной поддержке РФФ грант 18-12-00080 и РФФИ грант №16-52-14006.

1. Shaikhislamov, I. F., et al. // MNRAS 2018. V. 481.4. PP. 5315-5323.
2. Shaikhislamov, I. F., et al. // The Astrophysical Journal 2018. V. 866.1 P. 47.
3. Khodachenko M. L. et al. // The Astrophysical Journal 2017. V. 847. P. 126.

О КОНУСАХ МАХА В РЕЗОНАНСНОМ ИЗЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СВИСТОВЫХ ВОЛН ПЕРЕДНИМ ФРОНТОМ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ НА ВЫСОКИХ ДОППЛЕРОВСКИХ РЕЗОНАНСАХ

Лундин Б.В.

ИЗМИРАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия, lundin.bv@gmail.com

Анализ пространственной структуры резонансного излучения электронного пучка в электронном свистовом моде на высоких Допплеровски сдвинутых резонансах (ДСР) в плотной плазме плазмосферы Земли указывает на возможность наиболее ранней регистрации вдали от оси пучка (после пролета его «головы») сигналов повышенной амплитуды на частотах сравнимых с фоновой гирочастотой электронов, а именно, близких к $f=0.81$ от ее значения. Результат основан на вычислении поля излучения вдали от оси пучка методом стационарной фазы. При этом в спектре излучаемых свистовых частот (на резонансах кроме Черенковского) всегда существует «ранняя» частота, сигнал на которой достигает с групповой скоростью удаленного (в направлении поперек геомагнитного поля) приемника с минимальной задержкой после пролета переднего фронта пучка. Сопутствующий всплеск амплитуды регистрируемого сигнала (аналогичный «звуковому удару» при прохождении возмущения плотности на конусах Маха (КМ) от сверхзвуковых аппаратов) формируется волновыми полями с частотами близкими к «ранней» частоте. Стандартный метод стационарной фазы становится неадекватным вычислению амплитуды сигнала вблизи КМ и для оценки интервала частот, доминирующих при формировании пика сигнала на КМ используется приближение более высокого порядка. Для каждого из больших номеров ДСР формируются свои конуса Маха в свистовом излучении, причем тангенс угла их наклона к оси пучка (TgM) обратно пропорционален номеру ДСР, так что чем больше номер ДСР тем позднее его конус Маха достигает общего приемника излучения после пролета «головы» пучка. Начиная с $m=4$, крутизна наклона конуса Маха к оси пучка не превышает 0.1 , $TgM=(4/m)/10.4 < 0.1$, ширину спектра гармоник $Dlt(f)$, определяющих остроту КМ можно оценить по длительности первого пика «Эйри-оггибающей» их амплитуды на КМ.

Полученные простые соотношения для описания спектрально-временных особенностей поля свистовых волн, резонансно излучаемых электронным пучком на высоких ДСР, могут помочь определению деталей этого процесса, если он реализуется в плотной приземной плазме. При этом для высоких ДСР оптимальные параметры приемника излучения легко перестроить с изменением места проведения эксперимента, а именно: основная частота регистрации - вблизи ~ 0.8 от фоновой гирочастоты электронов, требуемая ширина частотных фильтров для удаленных приемников также меняется мало: уменьшается обратно пропорционально кубическому корню растущего номера m очередного высокого ДСР. Есть и единый для всех высоких ДСР асимптотический фактор (связан с Эйри представлением функций Бесселя от большого аргумента сравнимого с их индексом), обрезающий всплески амплитуды сигналов на КМ, если только тангенс питч - угла инжекции электронов не превышает 1.41 , что было отмечено уже в [1].

Конусы Маха в некогерентном излучении пучка не должны проявляться (см. [1]), что, в принципе, позволяет оценить длину когерентности в движении электронов пучка вблизи его переднего фронта; целенаправленно активные эксперименты нацеленные на высокие ДСР ранее не проводились.

1. Lundin B., Chmyrev V., Krafft C., Matthieussent G. // J. Geophys. Res. 1994. V. **99**. P. 14987.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРЫ GLIESE-436b СО ЗВЕЗДНЫМ ВЕТРОМ

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

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

Со времен первого запуска телескопа хаббл в открытый космос популярность исследования космических объектов резко возросла. В частности, лишь за последние 3 месяца было открыто порядка сотни экзопланет. Однако по причине удаленности данных объектов контактные способы измерения таких параметров, как температура, интенсивность ультрафиолетового излучения, плотность и скорость звездного ветра неприменимы. Поэтому в данном случае применяются транзитные и спектральные измерения.

Объект нашего исследования, Gliese-436b является так называемым «Теплым Нептуном», то есть имеет размер и массу, сходные с таковыми у Нептуна, однако расположен к своей родительской звезде значительно ближе (~ 0.03 а.е.). Атмосфера Gliese-436b состоит в основном из водорода, и звездная линия Ly- α активно поглощается в этой среде, поэтому транзитные измерения проводились в первую очередь именно на этой длине волны. Эта линия уширяется из-за эффекта Допплера и поглощается на определенных скоростях атомами планетарной атмосферы. По поглощенным областям спектра можно судить о скоростях компонент атмосферы и ее взаимодействия со звездным плазменным ветром. [1, 2]

В нашей работе реализована газодинамическая 3D-модель с учетом процессов ионизации и рекомбинации, плазмо-фото химии водородных компонент [3]. Использование этой модели позволяет изучить процессы, происходящие в атмосфере Gliese-436b, при различных параметрах ветра ее родительской звезды [наша статья]. Сравнивая модельные спектральные кривые с экспериментальными, представленными в работах [1, 2] можно сделать заключение о значениях таких параметров звездного ветра, как температура, плотность и интенсивность ультрафиолетового излучения

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 18-12-00080.

1. Ehrenreich D., Bourrier V. // Nature, 2015, V. **522**, P. 459-461
2. Lavie B., Ehrenreich D., Bourrier V. // A&A, 2017, V. **605**
3. Shaikhislamov I.F., Khodachenko M. L., Lammer H. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. December 2018

НОВАЯ АСТРОФИЗИКА – ФИЗИКА ЗАРЯЖЕННЫХ КУМУЛЯТИВНО-ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР КОСМОСА

Высикайло Ф. И.

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

Впервые исследуется синергетика (со-организация, совместное действие) конвективных кумулятивных и диссипативных потоков в области заряженных структур Космоса: звезд и планет, в частности исследуются причины возникновения солнечного ветра и ионосферы Земли. Показано, что возможное объяснение возникновения солнечного ветра (потоков положительно заряженных ионов от Солнца) — слабое нарушение нейтральности Солнца и возникновение для протонов и альфа-частиц кулоновских зеркал, отражающих и ускоряющих от Солнца, положительно заряженные ионы с $Z/M \geq 0,1$. Положительный заряд Солнца возникает из-за постоянного ухода малой части высокоэнергетичных электронов от Солнца и внедрения их, например, в планеты и пыль. Известно, что Земля заряжена до 500 кКл. Определены параметры положительно заряженного Солнца (его заряд – 1,5 кКл), позволяющие оценить приведенную к плотности частиц напряжённость электрического поля (E/N) в всей гелиосфере и исследовать условия необходимые для отражения от положительно заряженного Солнца различных положительно заряженных частиц и тяжелых ионов. В работе впервые предлагается конкретный механизм нагрева плазмы солнечного ветра в его короне в постоянном кулоновском поле всего Солнца, как положительно заряженной кумулятивно-диссипативной (КД) структуры. В этой модели мы объединяем такие явления как электрический ветер, плазменный ветер и солнечный ветер в единое явление, обусловленное нарушением нейтральности и существенным нагревом частиц плазмы в электрическом поле заряженной структуры (заряженной иглы во Франклиновом колесе, положительно заряженного Солнца, отрицательно заряженной Земли и др.). Косвенным признаком кумулятивных процессов в КД структурах типа Солнца и Солнечной системы может являться не только вращение (об этом утверждал Е.И. Забабахин), но и нарушение нейтральности и формирование противоположно направленных – бициклонических вращающихся потоков кумулирующей всей массы Солнца к его центру и расфокусирующей массы солнечного ветра, покидающего солнечную систему, см. подробнее [1]. Зная ионный состав солнечного ветра, согласно предложенной в данной работе методике, мы можем рассчитать электрические параметры самого Солнца, его короны и оценить энергетические параметры солнечного ветра в области Земли. По известному заряду Земли построены профили температуры электронов в нижней ионосфере Земли. Доказано, что в нижней ионосфере идут процессы ионизации в поле отрицательно заряженной Земли.

При кумуляции массы происходит не только усиление вращения, но и нарушение нейтральности кумулятивно-диссипативной структуры. Нарушение нейтральности приводит к возбуждению турбулентных (вихревых) потоков. Следовательно, косвенным признаком кумуляции являются вращение структуры, нарушение её нейтральности, генерация магнитного поля и турбулентных (вихревых) потоков плазмы на её поверхности. Решаемые в этой работе задачи, представляют интерес в широком диапазоне физических задач, в том числе для теории лабораторной газоразрядной плазмы, физики устойчивости спутников на их орбитах и теории функционирования таких систем как GPS/ГЛОНАСС. Анализируются возможные функциональные свойства положительно заряженного джета из центра галактики М 87.

1. Высикайло Ф.И. Архитектура кумуляции в диссипативных структурах. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing. 2013, - 352 с.

ОСОБЕННОСТИ ТОКОВЫХ СЛОЕВ, РАЗВИВАЮЩИХСЯ В ПЛАЗМЕ С ИОНАМИ РАЗЛИЧНОЙ МАССЫ

Франк А.Г., Сатунин С.Н.

ИОФ РАН, г. Москва, Россия, annfrank@fpl.gpi.ru

Исследованы особенности структуры и эволюции токовых слоев в зависимости от массового состава плазмы, в которой происходило формирование слоя. Эксперименты проводились с помощью установки ТС-3D (ИОФ РАН) [1]. Токовые слои развивались при возбуждении в замагниченной плазме электрического тока вдоль нулевой (или особой) линии 2D (или 3D) магнитного поля. Плазма создавалась в одном из благородных газов: He, Ar, Kr, или Xe, что позволяло варьировать массу ионов в довольно широких пределах. Пространственные распределения 3D магнитных полей, которые создавались токами плазмы, измерялись в двух сечениях токового слоя, в направлениях нормали к его средней плоскости. На основе магнитных измерений рассчитывалась структура как основного (продольного) тока, так и токов Холла [2]. При формировании токовых слоев в 2D магнитных конфигурациях с нулевой линией токи Холла однозначно связаны с продольной компонентой магнитного поля, которая направлена вдоль основного тока в слое и имеет квадрупольный характер [3].

Установлено, что распределения тока в «физических величинах» практически не зависят от рода газа, в котором развивался токовый слой, но для распределений тока в безразмерных величинах ситуация существенно меняется, см. также [4]. Нормировочными коэффициентами служили ионная инерционная длина d_i и характерная плотность тока j_0 , которая зависит от тепловой скорости ионов [4,5]. Эти величины вычислялись для выбранных экспериментальных условий, моментов времени и пространственных координат на основании конкретных параметров плазмы, которые были получены экспериментально с помощью независимых измерений.

Показано, что в эксперименте можно создавать как «тонкие», так и «толстые» токовые слои, в зависимости от массы ионов плазмы. Так, в He плазме поперечный размер (толщина) слоя составляла $\approx (6-10) \cdot d_i$, тогда как в плазме с тяжелыми ионами (Ar, Kr, Xe) толщины токовых слоев не превышали $\approx (1-2) \cdot d_i$.

Из общих физических соображений можно предполагать, что эффект Холла должен проявляться преимущественно в относительно тонких токовых слоях, с толщиной порядка ионной инерционной длины [6]. Действительно, непосредственные измерения показали, что в тонких слоях относительный вклад эффекта Холла значительно более ярко выражен, чем в толстых. Этот вывод согласуется также со спутниковыми наблюдениями в токовом слое хвостовой части магнитосферы Земли [5,7].

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0024-2018-0045.

1. Франк А.Г. // УФН 2010. Т. 180(9). С. 982.
2. Франк А.Г., Сатунин С.Н. // Физика плазмы 2018. Т.44. С. С.144.
3. Frank A.G., Bugrov S.G., Markov V.S. // Phys. Plasmas. 2008. V. 15(9). P. 092102.
4. Франк А.Г., Островская Г.В., Юшков Е.В. и др. // Космич. Исслед. 2017. Т.55. С.48.
5. Юшков Е.В., Франк А.Г., Артемьев А.В., и др. // Физика плазмы 2018. Т.44. С. С.983.
6. Кингсен А.С., Чукбар К.В., Яньков В.В. // Вопросы теории плазмы. 1987. Вып.16. С.209.
7. Франк А.Г., Артемьев А.В., Зеленый Л.М. // ЖЭТФ 2016. Т.150. С. 807.

ПРОСТРАНСТВЕННО 2-МЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТОНКОГО ТОКОВОГО СЛОЯ С НОРМАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТОЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С КИНЕТИЧЕСКИМ ОПИСАНИЕМ ЗАМАГНИЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

О.В. Мингалев¹, И.В. Мингалев¹, Х.В. Малова^{2,3}, Л.М. Зеленый³

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

Для стационарных пространственно двумерных тонких токовых слоев (ТТС) в бесстолкновительной космической плазме, аналогичных по своим свойствам токовому слою ближнего хвоста магнитосферы на предварительной фазе суббури, в которых магнитное поле ортогонально току и имеет ненулевую нормальную компоненту, электроны замагничены, а ионы не замагничены, решена теоретическая проблема кинетического описания электронов. В результате для токовых слоев указанного типа создана теория, которая позволяет рассматривать полностью пространственно двумерные численные модели ТТС, вложенные в реалистичную конфигурацию магнитного поля и плазмы ближнего хвоста магнитосферы.

В предложенной теории для описания образующих ТТС падающих вдоль силовых линий магнитного поля потоков протонов используется уравнение Власова, а для описания замагниченных электронов применяется уравнение Власова в дрейфовом приближении.

Показано, что в рассматриваемой пространственно 2-мерной стационарной постановке в ТТС фазовые траектории электронов делятся на пролетные и захваченные, а их функция распределения ведущих центров имеет вид функции от трех интегралов дрейфовой системы уравнений движения в 0-м приближении: магнитного момента, полной энергии (гамильтониана) и единственной компоненты векторного потенциала магнитного поля. Для определения этой функции распределения необходимо задать две «входные» функции от трех указанных интегралов: первая описывает электроны на пролетных фазовых траекториях, которые пересекают ТТС, а вторая описывает электроны на захваченных фазовых траекториях внутри слоя.

В результате получается, что эти две «входные» функции от трех указанных выше интегралов полностью определяют функцию распределения ведущих центров электронов. При этом для концентрации и плотности тока электронов получаются интегральные выражения, которые зависят от этих двух функций, а также от магнитного поля. То есть вклад электронов в магнитное и электрическое поле описывается аналитически через эти две «входные» функции. Это приводит к нелинейному эллиптическому уравнению 2-го порядка относительно единственной компоненты векторного потенциала. Численное решение краевой задачи для этого уравнения позволяет найти стационарную конфигурацию ТТС.

Устанавливается, что при данном наборе внешних входных параметров возможна не единственная, а вообще говоря, бесконечное число стационарных конфигураций ТТС в зависимости от вида функции распределения электронов на захваченных фазовых траекториях внутри слоя, важная роль которой выявлена здесь впервые. Детально исследован важный частный случай распределения Максвелла-Больцмана для электронов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-01-00100.

ВЛИЯНИЕ НА СТАЦИОНАРНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ТОНКОГО ТОКОВОГО СЛОЯ С ПОСТОЯННОЙ НОРМАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТОЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СКОРОСТИ ОБРАЗУЮЩИХ СЛОЙ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ

О.В. Мингалев¹, И.В. Мингалев¹, Х.В. Малова^{2,3}, М.Н. Мельник¹, П.В. Сецко¹, Л.М. Зеленый³

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

Рассматривается стационарный пространственно 1-мерный тонкий токовый слой (ТТС) в бесстолкновительной космической плазме, аналогичный по своим свойствам токовому слою ближнего хвоста магнитосферы на предварительной фазе суббури, в котором магнитное поле ортогонально току и имеет ненулевую нормальную компоненту, электроны замагничены, а ионы не замагничены. Применяется численная модель, в которой для описания образующих ТТС падающих вдоль силовых линий магнитного поля потоков протонов используется уравнение Власова, которое решается численно, а для описания замагниченных электронов применяется уравнение Власова в дрейфовом приближении, для которого получено точное решение в форме распределения Максвелла-Больцмана в стационарном электромагнитном поле.

Для численного решения стационарного уравнения Власова применен новый разработанный авторами метод, в котором для аппроксимации функции распределения используется фиксированная регулярная сетка в координатном пространстве и подвижная регулярная сетка в пространстве скоростей с фиксированным размером и шагом, с центром в локальной гидродинамической скорости, и с возможностью ориентации ее осей по магнитному полю. Этот прием позволяет отслеживать носитель функции распределения в пространстве скоростей при помощи сетки минимального размера. По сравнению с методом частиц новый метод дает намного более точную аппроксимацию функции распределения и граничных условий. Новый метод удобен для построения эффективных параллельных алгоритмов с выполнением основной части вычислений на графических процессорах, и позволяет создавать численные модели крупномасштабных процессов в бесстолкновительной космической плазме, заведомо недоступные для моделирования методом частиц.

На основе этого метода для пространственно одномерной модели ТТС с распределением Максвелла-Больцмана для электронов создан набор программ с расчетом траекторий протонов на графических процессорах, с помощью которого получен ряд конфигураций тонкого токового слоя в симметричной постановке и исследованы электростатические эффекты, роль анизотропии давления электронов, роль гидродинамической скорости образующих слой потоков ионов, а также точность выполнения уравнения силового баланса для протонов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-01-00100.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ ПО ДАННЫМ МИССИИ MMS

Виноградов А.А., Васько И.Ю., Артемьев А.В., Юшков Е.В.

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

Интенсивные (тонкие) токовые слои играют важную роль в динамике плазмы солнечного ветра. МГД и гибридные моделирования плазмы солнечного ветра показывают, что интенсивные токовые слои могут разрушаться в результате развития тиринг (tearing) неустойчивости, что приводит к диссипации энергии магнитного поля и нагреву плазмы. Поэтому для исследования эффективности пересоединения и нагрева плазмы важен анализ свойств интенсивных токовых слоев, наблюдаемых в солнечном ветре. Миссия MMS предоставляет возможность детально изучить тонкие токовые слои в солнечном ветре с беспрецедентным временным и пространственным разрешением. В нашей работе при помощи метода «PVI» было отобрано порядка 160 токовых слоев, наблюдавшихся 7 ноября 2017 года, из которых 34 наблюдались в «burst» режиме. Для восстановления системы координат, связанной с токовым слоем, используется комбинация метода минимальной вариации «MVA» и метода временных задержек «timing». Поскольку расстояние между спутниками MMS составляет менее 10 км (что меньше масштабов токовых слоев), для вычисления тока использовался многоспутниковый метод curlometer. Показана применимость данного метода путем сравнения полученных токов с оценками тока по методу «timing».

Обнаружены токовые слои с амплитудой вплоть до 150 нА/м^2 и толщиной до 10 км. Проведен статистический анализ толщин токовых слоев, плотности тока и параметров плазмы. Проанализирована гипотеза о нагреве плазмы в токовых слоях.

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ В ГЕЛИОСФЕРЕ

Р.А. Кислов¹, О.В. Хабарова², Х.В. Малова^{1,3}

¹ ИКИ РАН, Москва, Россия, kr-rk@bk.ru

² ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия

³ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Отдел излучений и вычислительных методов, Москва, Россия.

Исторически, при моделировании солнечного ветра, магнитное поле Солнца предполагалось дипольным или близким к нему. В этом приближении в гелиосфере существует только один квазистационарный токовый слой - гелиосферный. Однако известно, что магнитное поле Солнца устроено сложнее и в определённые фазы цикла на фоне снижения дипольного поля, наблюдаются существенные квадрупольные и более высокие гармоники. Комбинация дипольного и мультипольного магнитных полей может приводить к появлению в солнечной короне дополнительных магнитных нейтральных линий, которые будут вытягиваться в квазистационарную токовую конфигурацию в гелиосфере, а также могут способствовать нарушению симметрии в направлении «север-юг». В докладе представлена стационарная осесимметричная МГД-модель токовых слоёв в гелиосфере. Модель предсказывает, что количество, форма и положение квазистационарных токовых слоёв в солнечном ветре зависят от вклада квадрупольной и октупольной компонент в общее магнитное поле Солнца. Показано, что если дипольная компонента магнитного поля Солнца доминирует над остальными, то токовый слой, соответствующий гелиосферному токовому слою (ГТС), будет единственным на низких гелиоширотах. В остальных случаях число квазистационарных токовых слоёв может меняться в пределах от одного до трёх. Так, дополнительно к ГТС могут сформироваться и другие квазистационарные токовые слои на средних и/или высоких гелиоширотах. В реальности, на Солнце может наблюдаться большее число нейтральных линий из-за нестационарных процессов в многополярных активных областях. Самые устойчивые из них могут вытягиваться в гелиосферу и формировать нейтральные поверхности крупномасштабных токовых структур в солнечном ветре, расположенных на различных гелиоширотах (при фиксированном гелиоцентрическом расстоянии). Последнее обстоятельство может стать причиной неверной интерпретации *in situ* наблюдений.

**ФОРМИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОНОВ В ХВОСТЕ
МАГНИТОСФЕРЫ**

Шустов П.И., Артемьев А.В., Васько И.Ю., Петрукович А.А., Юшков Е.В.
ИКИ РАН, Москва, Россия,

В представленной работе исследуется динамика спектров электронов, при конвекции частиц из дальнего плазменного слоя к Земле. Мы используем одновременные наблюдения спектров электронов тремя аппаратами THEMIS на разных радиальных расстояниях в хвосте магнитосферы. Спутниковые наблюдения вблизи экваториальной плоскости сопоставлены с моделью адиабатического нагрева электронов при конвекции к Земле. В рамках этой модели произведены оценки потери электронов, необходимые для воспроизведения наблюдаемых спектров. Дальнейшее сравнение модели и наблюдаемых спектров позволяет сделать вывод, что потери горячих (> 1 кэВ) электронов должны достигать предела сильной диффузии или даже превосходить его, что говорит о необходимости *эффективного расширения* конуса потерь электронов за счёт продольных электрических полей. Также в докладе рассматриваются возможные механизмы потерь электронов и их роль в формировании наблюдаемых спектров.

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ КИСЛОРОДА НА СТРУКТУРУ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

Домрин В.И.¹, Малова Х.В.^{1,2}, Попов В.Ю.^{3,2}, Григоренко Е.Е.²

¹НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, hmalova@yandex.ru

²ИКИ РАН, г. Москва, Россия,

³Физический ф-т МГУ

Во время геомагнитных суббурь токовый слой хвоста магнитосферы Земли может уменьшаться в поперечном направлении до масштаба порядка одного-нескольких протонных гирорадиусов, при этом может происходить одновременное насыщение плазмы однозарядными ионами кислорода из ионосферы. Их воздействие на структуру утоньшенного токового слоя является целью настоящего исследования. В рамках гибридной квазиadiaбатической модели показано, что ТС является многомасштабной структурой, вложенной в широкий плазменный слой. Рост концентрации ионов кислорода может приводить к формированию многомасштабной вложенной структуры токового слоя, что сопровождается сменой градиентов магнитного поля и плотности тока на профилях характеристик токового слоя, что характеризует переход от области доминирования ионов кислорода к протонной области внутри токового слоя. Показаны параметрические зависимости характеристик токового слоя от концентрации и других характеристик ионов кислорода. Последствия данного эффекта для интерпретации данных наблюдений обсуждаются.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 19-02-00957, а также Программ 28 ПрРАН и 1-24П ПрРАН.

СТРУКТУРА НАГРЕВА И УСКОРЕНИЯ КРИПТОНОВОЙ ПЛАЗМЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ ТОКОВЫХ СЛОЯХ

Кирий Н.П., Франк А.Г., Воронова Е.В.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия, kyrie@fpl.gpi.ru

В работе впервые исследованы распределения температуры однозарядных ионов Кг II в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль средней плоскости токового слоя (ось x) и вдоль нормали к средней плоскости слоя (ось y). Кроме того, было исследовано распределение кинетической энергии ионов Кг II в зависимости от расстояния до средней плоскости.

Токовые слои создавались с помощью установки ТС-3D в магнитном поле с нулевой линией X типа и градиентом $0,6$ кГс/см, начальное давление криптона ~ 30 мТорр, амплитуда тока в слое 45 кА, полупериод тока $T/2 = 6$ мкс. Часть экспериментов была выполнена в 3D магнитных конфигурациях, в которых вдоль направления тока прикладывалось однородное магнитное поле с индукцией ~ 3 кГс [1]. Регистрировались профили спектральной линии Кг II $473,9$ нм, которая уширяется за счет эффекта Доплера. Для разделения тепловых и направленных движений ионов измерения проводились одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях, подробнее см. [2, 3].

Установлено, что в процессе формирования токового слоя, когда быстро растет концентрация и температура электронов [4], температура ионов криптона Кг II продолжительное время остается постоянной и равной температуре начальной плазмы $T_i \approx 60 - 70$ эВ [5], при этом температура ионов одинакова как собственно в токовом слое, так и в его окрестности. Позднее, при $t \geq 4$ мкс, температура ионов Кг II в слое быстро увеличивается и достигает величины $T_i^{\max} \approx 130$ эВ. Полуширина распределения температуры ионов Кг II вдоль нормали к средней плоскости токового слоя $T_i(y)$ превышает полуширину распределения интенсивности $J(y)$ спектральной линии иона Кг II $473,9$ нм, а полуширина распределения $J(y)$ качественно характеризует меньший поперечный размер слоя (вдоль оси y), или его толщину.

Показано, что вдоль средней плоскости слоя, или его ширины (ось x), температура ионов криптона Кг II на ранней стадии эволюции токового слоя распределена практически равномерно как при формировании слоя в 2D, так и 3D магнитных конфигурациях. На поздней стадии эволюции токового слоя в 2D магнитной конфигурации в центре слоя появляется локальный максимум.

Установлено, что максимальная энергия ионов Кг II, ускоренных под действием сил Ампера вдоль большего поперечного размера токового слоя (ось x), составляет $W_x \approx 460$ эВ. Показано, что распределение энергии ионов криптона $W_x(y)$ имеет максимум в средней плоскости токового слоя.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0024-2018-0045.

1. Frank A.G., Kyrie N.P. // Plasma Phys. Reports. 2017. V. **43**. P. 696.
2. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г. // Физика плазмы. 2010. Т. **36**. С. 387.
3. Франк А.Г., Кирий Н.П., Марков В.С., Воронова Е.В. // Физика плазмы. 2018. Т. **44**. С. 483.
4. Воронов Г.С., Кирий Н.П., Марков В.С., Островская Г.В., Франк А.Г. // Физика плазмы. 2008. Т. **34**. С. 1080.
5. Кирий Н.П., Марков В.С., Васильков Д.Г., Воронова Е.В. // Тезисы 45 Международной Звенигородской конференции. 2018. С. 241.

**МГД-МОДЕЛЬ ТОКОВОГО СЛОЯ МАГНИТОПАУЗЫ С НАКЛОННЫМ К ГРАНИЦЕ
ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА**

Юшков Е.В., Артемьев А.В., Петрукович А.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, yushkov.msu@mail.ru

В настоящей работе мы исследуем модель токового слоя, разделяющего области сильного магнитного поля и интенсивного плазменного потока. Нами используется базовая МГД-модель, предложенная Никелером и Вигельманом в 2010 году для описания переходной области с потоком параллельным границе. Однако, мы рассматриваем ее дальнейшее развитие для потоков, падающих под некоторым углом к поверхности. В докладе обсуждается применимость полученных результатов к описанию земной магнитопаузы и исследуется зависимость характеристик переходной области от скорости потока и амплитуды магнитного поля. Анализируются проблемы, вытекающие из мгд-постановки задачи и из предположений о квази-двумерной геометрии токового слоя, делается акцент на различиях между построенным токовым слоем и токовым слоем реальной магнитопаузы, обсуждаются возможности дальнейшего развития модели для возможности ее применения к случаям дневной и фланговой области границы магнитосферы.

Работа поддержана грантом РФФИ N 18-02-00218.

СУБКРИТИЧЕСКОЕ МЕЛКОМАСШТАБНОЕ ДИНАМО В ПОТОКЕ С НЕНУЛЕВОЙ МАГНИТНОЙ СПИРАЛЬНОСТЬЮ

Юшков Е.В., Лукин А.С., Соколов Д.Д.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, yushkov.msu@mail.ru

В настоящей работе исследуется возможность развития мелкомасштабного динамо в случайном потоке со слабой зеркальной асимметрией при докритических условиях генерации. Показано, что появление асимметрии в дельта-коррелированном Казанцевском потоке приводит к генерации крупномасштабных периодических возмущений. Эти возмущения, в свою очередь, поддерживают активную генерацию поля на малых масштабах даже при докритических магнитных числах Рейнольдса. Мы описываем свойства такой поддержки, мощность генерации и характерные масштабы, зависящие от скорости случайного потока и степени его спиральности. Переводя задачу в спектральную область, мы демонстрируем формирование двусоставного мелко- и крупномасштабного спектра, состоящего из пика, локализованного на больших масштабах, и степенных зависимостей при больших и малых k . Как и в сверхкритическом случае доказывается смена знака спиральности на малых масштабах. Особо отмечается возможность прямой проверки описываемых спектральных свойств в докритических лабораторных МГД экспериментах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПЫЛЕ-АКУСТИЧЕСКИМ СОЛИТОНОМ

Трухачев Ф.М.^{1,2}, Петров О.Ф.^{1,3}, Васильев М.М.^{1,3}, Герасименко Н.В.²

¹ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, ftru@mail.ru

²БРУ, г. Могилев, Беларусь

³МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

В работах [1, 2] в рамках МГД моделей плазмы исследованы токи индуцируемые ионно- и электронно-акустическими солитонами в плазме. Показано, что солитоны приводят к ускорению и переносу заряженных частиц холодных популяций плазмы в направлении своего движения. Токи, формируемые каскадом солитонов, имеют импульсную структуру со значительной постоянной составляющей. Для экспериментального подтверждения выводов теории был поставлен эксперимент по исследованию динамики заряженных частиц в пылевой плазме в условиях развитой пыле-акустической неустойчивости. Выбор указанного объекта исследования обусловлен следующими соображениями. Во-первых, пыле-акустические солитоны можно описать в рамках МГД моделей используемых в [1, 2], отличающихся только пространственными и временными масштабами. Во-вторых, пылевая плазма позволяет проследить динамику заряженных микрочастиц на кинетическом уровне, что значительно упрощает постановку эксперимента. Сам эксперимент выполнен в тлеющем разряде низкого давления, при комнатной температуре в неоне [3]. Динамика отдельных частиц в поле солитона получена на основе анализа кадров видеосъемки волнового процесса, которая велась с частотой 500 кадров в секунду.

Было установлено, что при определенных условиях в страте тлеющего разряда формируется пылевое облако из заряженных монодисперсных частиц меламин-формальдегида диаметром $d = 4.25 \pm 0.09$ мкм. Под действием силы ионного увлечения в облаке развивалась пыле-акустическая потоковая неустойчивость, которая приводила к формированию уединенной волны большой амплитуды. Волна распространялась от анода к катоду, приводя плазму в турбулентное состояние. Анализ треков заряженных пылевых частиц позволил сделать вывод, что солитон перемещает их в направлении своего движения на несколько радиусов Дебая (вплоть до десяти). Скорость частиц, направление и величина их перемещения хорошо описываются теорией солитонных токов предложенной в [1, 2]. Достигая нижнего края пылевого облака пыле-акустический солитон распадался, а укоренные им заряженные частицы выбрасывались за пределы облака.

Таким образом, экспериментально обосновано свойство солитоннов ускорять заряженные частицы и генерировать электрические токи в плазме.

1. Трухачев Ф.М., Томов А.В. // Космические исследования 2016. Т. **54**. С. 377.
2. Трухачев Ф.М., Томов А.В., Могилевский М.М., Чугунин Д.В. // Письма в ЖТФ 2018. Т. **44**. С. 87.
3. Петров О.Ф., Трухачев Ф.М., Васильев М.М., Герасименко Н. В. // ЖЭТФ 2018. Т. **153**. С. 1012.

LEVY FLIGHTS ON A COMB AND THE PLASMA STAIRCASE

Milovanov A.V.^{1,2} and **Rasmussen J. Juul.**³

¹ ENEA-C.R.Frascati, Rome, Italy, alexander.milovanov@enea.it ²IKI-Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ³DTU-Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark

We formulate the problem of confined Levy flight on a comb. The comb represents a sawtooth-like potential field $V(x)$, with the asymmetric teeth favoring net transport in a preferred direction. The shape effect is modeled as a power-law dependence $V(x) = |Ax|^n$ within the sawtooth period, followed by an abrupt drop-off to zero, after which the initial power-law dependence is reset. It is found that the Levy flights will be confined in the sense of generalized central limit theorem, if (i) the spacing between the teeth is sufficiently broad, and (ii) $n > 4 - \alpha$, where α is the fractal dimension of the flights. In particular, for the Cauchy flights ($\alpha = 1$), $n > 3$. The study is motivated by recent observations of localization-delocalization of transport avalanches in banded flows in the Tore Supra tokamak (Cadarache, France) and is intended to devise a theory basis to explain the observed phenomenology. A full account of the investigations, presented here, is reported in Ref. 1.

1. Milovanov A.V., Rasmussen J.J. // Phys. Rev. E 2018. V. **98**. art. 022208.

ИНДУЦИРОВАННЫЕ ШУМОМ КИНЕТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ В ГРОЗОВЫХ И АЭРОЗОЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПЛАНЕТАРНЫХ АТМОСФЕР

Иудин Д.И.

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

В настоящей работе процессы формирования в грозовых и аэрозольных облаках плазменных образований с параметрами необходимыми для зарождения и развития молниевых разрядов рассматриваются как индуцированный квазиэлектростатическим шумом неравновесный фазовый переход. Источником шума является коллективное электрическое поле взвешенных в конвективном потоке заряженных частиц. За последние 30 лет индуцированные шумом неравновесные фазовые переходы заняли особое место в статистической физике и радиофизике сложных систем. Стало очевидно, что даже небольшой шум может вызвать качественные изменения в системе, находящейся вдали от теплового равновесия. Наличие шума может не просто уменьшать, а, наоборот, существенно увеличивать чувствительность систем к слабым внешним воздействиям и приводить к появлению динамических режимов, реализация которых при отсутствии шума невозможна. В грозовых и аэрозольных системах планетарных атмосфер, где взаимодействующие компоненты имеют контрастные свойства (существенно различающиеся подвижности, коэффициенты диффузии, времена жизни), добавление шума приводит к эффекту подпорогового размножения с перераспределением «ресурса» компонент (депонированием) и сопровождается существенным понижением порога генерации сложных (чаще всего, фрактальных) диссипативных структур по сравнению с системами без шума. На примере стохастического роста концентрации ионной компоненты и инициации молниевых разрядов рассмотрена фундаментальная связь индуцированных шумом неравновесных фазовых превращений со стохастической геометрией, в частности с эффектами направленной перколяции.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским Научным Фондом, соглашение 17-12-01439.

1. Иудин Д.И., Давыденко С.С., Готлиб В.М., Долгоносков М.С., Зелёный Л.М. "Физика молнии: новые подходы к моделированию и перспективы спутниковых наблюдений" УФН 188 850-864 (2018).
2. Iudin, D.I. Lightning-Discharge Initiation as a Noise-Induced Kinetic Transition, Radiophys Quantum El (2017), Vol. 60, No. 5, , pp. 374 - 394, doi.org/10.1007/s11141-017-9807-x.
3. Iudin, D. I., V. A. Rakov, E. A. Mareev, F. D. Iudin, A. A. Syssoev, and S. S. Davydenko (2017), Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of LPCR in determining lightning type, J. Geophys. Res. Atmos., 122, doi:10.1002/2016JD026261.
4. Davydenko S.S., Iudin D.I. (2016), Fractal model of the compact intracloud discharge. II. Specific features of electromagnetic emission // Radiophysics and Quantum Electronics, Vol. LVIX, No 7, pp. 560 - 575.
5. Iudin D.I., Iudin F.D., Hayakawa M. (2015), Modeling of the intracloud lightning discharge radio emission // Radiophysics and Quantum Electronics, Vol. LVIII, No 3, pp. 187 - 199.
6. Iudin D.I., Davydenko S.S. (2015), Fractal model of the compact intracloud discharge. I. Features of the structure and evolution // Radiophysics and Quantum Electronics, Vol. LVIII, No 7, pp. 530 - 551.
7. Iudin D.I., Sergeyev Ya.D., Hayakawa M. (2015), Infinity computations in cellular automaton forest-fire model // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 20(3), 861-870.

ОБ ОДНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЫСТРОГО ДИНАМО

Жужома Е.В.

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

Известно (см. [1]), что в 70-ых годах 20-ого века Я.Б. Зельдович предложил конструкцию так называемого веревочного динамо, которая в идейном плане легла в основу современных геометрических конструкций трехмерных моделей недиссипативного быстрого динамо. С точки зрения современной теории динамических систем конструкция Зельдовича представляет собой преобразование Смейла полнотория в себя, которое приводит к так называемому соленоиду Смейла и которое имеет положительную топологическую энтропию (то есть, отображение достаточно хаотичное). Как отмечалось в [1] (см. обсуждение в гл. V), с точки зрения теории кинематического динамо указанная конструкция имеет существенный недостаток, состоящий в том, что предложенное отображение не является консервативным. В докладе мы приводим модификацию конструкции Зельдовича, лишенную этого недостатка в окрестности соленоидального инвариантного множества. Показывается, что построенное отображение продолжается до отображения трехмерного евклидова пространства.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект 17-11-01041.

1. Арнольд В.И., Хесин Б.А. Топологические методы в гидродинамике. М., МЦНМО, 2007.

ПОИСК И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КИНЕТИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ДЫР В ПОТОКАХ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Потапов А.С.

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

Создана компьютерная программа, позволяющая вести автоматический поиск так называемых кинетических «магнитных дыр» [1] в данных космических аппаратов ACE и Wind. Результаты использования программы для интервалов высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ) в 23 цикле солнечной активности с 1996 по 2011 гг. позволили выявить статистические закономерности наблюдения этих элементов турбулентности межпланетной плазмы. За критерий отбора дыр принято условие $Q > 7$, принятое в работе [2], где $Q = D/S_{vic}$, D – глубина понижения модуля $|\mathbf{B}|$ напряженности межпланетного магнитного поля, а S_{vic} – среднеквадратичное отклонение вариаций B в окрестности дыры, исключая ее саму. В качестве окрестности взят интервал, на порядок превышающий длительность дыры. Дополнительно к принятому в [2] был использован критерий по глубине дыры: $D > 2$ нТл. Различались дыры изолированные и гнездообразные, то есть, такие, в которых внутри широкой дыры помещались дыры меньшей длительности. Показано, что вероятность наблюдения магнитных дыр продолжительностью не более 2 мин в потоках альвеновского типа (это в основном CIR-потоки) намного превышает среднюю частоту их появления в окрестности эклиптики, но приближается к вероятности наблюдения в высокоширотном ветре. Анализ проводился отдельно для передней части потока (от минимума скорости СВ до ее максимума в потоке) и начала спада скорости СВ (36 часов вслед за максимумом). В спадающих частях потоков частота наблюдения магнитных дыр оказалась выше, чем в передних, но не намного. В обеих частях наиболее вероятны меньшие значения Q , близкие к 7, но распределение числа магнитных дыр по глубине имеет максимум при $D \sim 2$ нТл, причем он больше выражен для спадающих частей потоков. Распределение по длительности дыр в обеих частях потоков имеет максимум при $\Delta t \sim 5-9$ с, но для изолированных и глубоких дыр он выражен слабее. Полученные особенности будут использоваться для дальнейшего изучения роли магнитных дыр в общей картине турбулентности солнечного ветра, в частности, их потенциала для микропроцессов магнитного пересоединения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проектов РФФИ 16-05-00631 и 19-05-00574.

1. Zurbuchen T.H. et al. // J. Geophys. Res. 2001. V. **106**. P. 16,001.
2. Stevens M.L., Kasper J.C. // J. Geophys. Res. 2007. V. **112**. P. A05109.

ОСОБЕННОСТИ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Князева И.С., Макаренко Н.Г.

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

В работе рассматриваются особенности построения систем машинного обучения данным для прогнозирования солнечных вспышек и предлагается прототип такой системы.

В большинстве работ по прогнозу солнечных вспышек используется стандартный подход к формированию выборки для решения задачи бинарной классификации [1]. А именно, на основе наблюдаемой выборки формируется набор отрицательных и положительных событий. Затем, ставится задача разделения этих событий, в предположении их взаимной независимости. Под «событием» здесь понимается набор выбранных характеристик активных областей Солнца (АО) в определённый период времени. Далее, для этих событий оценивается какая-либо модель классификации, которой, чаще всего служит SVM (support vector machine). В этом подходе есть несколько проблем. Так, в одной и той же АО может произойти несколько вспышек в последовательные моменты времени. Предположение о независимости примеров не исключает случаев появления в обучающей выборке события из будущего. Об этой проблеме обычно упоминается, но делается предположение что количество таких ситуаций невелико и модель лишь неявно предполагает возможность таких ситуаций [1,2]. Кроме того, данный подход не отражает реальной постановки задачи мониторинга: в конкретный момент времени для каждого активного элемента на солнечном диске необходимо оценить вероятность появления события определённого класса в заданном временном интервале. Таким образом, задача которая решается с помощью модели, отличается от реальной задачи [1,2].

Мы предлагаем реализацию системы прогноза вспышек, максимально приближенную к задаче оперативного мониторинга. В рамках данной системы выборка данных организована следующим образом. Начиная с 20 июля 2010 года, с дискретом в 1 час в обучающую выборку добавляется момент времени и все АО на диске (согласно классификации NOAA). Таким образом, если в некоторый момент было 10 АО, то в выборку добавляется 10 примеров, и ничего не добавляется в противном случае. В качестве целевых переменных, добавляется интересующая цель, например, реализация в последующие 24 часа вспышки выше M1 или выше M5.

В построенном нами компьютерном прототипе схемы, в качестве характеристик АО мы использовали SHARP параметры в текущий момент, изменение их за предыдущие 24 часа и накопленный поток GOES в этой области до выбранного момента. На этих данных тестировались разные модели машинного обучения, которые объединялись затем в ансамбль. Для подбора параметров моделей при обучении использовалась валидация с учетом времени: оценка качества всегда делалась по будущим данным. В зависимости от выбранной метрики для оценки качества можно получать разные модели. В варианте, когда целью было наилучшее выявление всех событий, удалось добиться 100% результата, с 15% ложноположительных срабатываний.

1. Barnes, Graham, et al. //The Astrophysical Journal 2016. V 829(2) P. 89.
2. Bobra, M. G., & Couvidat, S. The Astrophysical Journal, 2015. V 798(2), P.135.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ ПО ДАННЫМ ПАТРУЛЬНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

Тлатов А.Г.^{1,2}, Стрелков М.А.¹, Березин И.А.¹

¹*Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, tlatov@mail.ru*

²*КалмГУ, Элиста*

В настоящее время для количественного прогнозирования космической погоды используются комплексные математические модели. Для определения параметров солнечного ветра и эволюции корональных выбросов массы (КВМ) наиболее широкое распространение получила корональная модель Wang-Sheeley-Argе (WSA) [1;2] в сочетании с глобальной гелиосферной моделью солнечного ветра ENLIL [3].

Другим подходом для определения параметров КВМ основано на предположении, что в динамике КВМ доминирует «аэродинамическое» сопротивление МГД [4]. В этом предположении КВМ которые движутся быстрее, чем окружающий солнечный ветер, замедляются, тогда как те КВМ, которые медленнее, чем солнечный ветер, ускоряется окружающим потоком [5].

В данной работе мы предлагаем модели и схему прогноза, основанную на наблюдениях телескопа-магнитографа СТОП для определения параметров спокойного солнечного ветра на основе эмпирической модели WSA, определения параметров КВМ на начальном этапе распространения по данным патрульных телескопов и расчет распространения КВМ на основе аэродинамического взаимодействия КВМ с солнечным ветром.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 18-02-00098 и РНФ проект 15-12-20001.

1. Arge, C.N., Pizzo, V.J., // J. Geophys. Res., 2000 105, 10465.
2. Arge, C.N., Luhmann, J.G., Odstr̃cil, D., Schrijver, C.J., Li, Y.// J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2004 66, 1295.
3. Jian, L.K., Russell, C.T., Luhmann, J.G., MacNeice, P.J., Odstr̃cil, D., Riley, P., Linker, J.A., Skoug, R.M., Steinberg, J.T.// Solar Phys. 2011, 273, 179.
4. Cargill, P.J., Chen, J., Spicer, D.S., Zalesak, S.T.// J. Geophys. Res. 1996, 101, 4855.
5. Vr̃šnak, B., Vrbanc, D., Calogovi'c, J.// Astron. Astrophys. 2008, 490, 811.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ГКЛ И СКЛ ДЛЯ БУДУЩИХ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Подзолко М. В.¹, Попова Е.П.², Панасюк М. И.³

¹ *НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

² *НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, popovaelp@mail.ru*

³ *НИИЯФ МГУ, Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия*

Исследование потоков галактических и солнечных космических лучей (ГКЛ и СКЛ) носит важный фундаментальный и прикладной характер. Они являются важной частью космической радиации, влияющей на работоспособность космической техники и здоровье экипажей космических кораблей, что необходимо учитывать при планировании будущих космических миссий.

В данной работе делается расчет потоков и доз ГКЛ и СКЛ на орбите Земли вне магнитосферы для разных фаз солнечной активности (в максимуме и в минимуме) и потоков и доз СКЛ в экстремальном солнечном событии. Такие расчеты можно применять для будущих полетов на Луну с использованием прогнозов солнечной активности на ближайшие циклы. Для расчетов потоков и доз ГКЛ и СКЛ нами были разработаны новые эмпирические модели [1, 2] и использован прогноз для 25 и 26 циклов, рассчитанный на основе работ [3, 4, 5].

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 17-22-010022 офи_м.

1. ISO/TR 18147, 2014
2. Kuznetsov N. V., Popova H., Panasyuk M. I. // Journal of Geophysical Research: Space Physics, **V. 122**. № 2. P. 1463
3. Tlatov A.G. // Adv. Space Res., 2015. **V. 55**. P. 851
4. Shepherd S. J., Zharkov S. I., Zharkova V. V. // Astrophys. J., 2014. **V. 795**. P. 46
5. Zharkova, V. V., Shepherd S. J., Popova E. et al. // Sci. Rep., 2015. **V. 5**. P. 15689

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА РОСТ ВЕЛИЧИНЫ ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В.Б. Белаховский¹, В.А. Пилипенко^{2,3}, Я.А. Сахаров¹, В.Н. Селиванов⁴

¹ – Полярный геофизический институт, г. Апатиты

² – Институт физики Земли РАН, г. Москва

³ – Геофизический центр РАН, г. Москва

⁴ – Центр физико-технический проблем энергетики Севера КНЦ РАН, г. Апатиты

В данной работе произведена оценка воздействия различных типов геомагнитных возмущений (SSC, TCV импульсы, суббури, P_iЗ пульсации) на величину геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ), регистрируемых в линиях электропередач Кольского полуострова и Карелии. Система регистрации ГИТ создана Полярным геофизическим институтом совместно с ЦФТПЭС КНЦ РАН и является единственной в России. Система регистрации ориентирована преимущественно в направлении север-юг. Для регистрации геомагнитных возмущений использованы данные магнитометров IMAGE.

Широко распространены модели ГИТ, в которых их основным источником являются вариации интенсивности аврорального электроджета, индуцирующие токи в широтном направлении. На основании этого считается, что магнитные возмущения представляют опасность преимущественно для технологических систем, вытянутых в направлении запад-восток. В данной работе на основе анализа вариабельности геомагнитного поля показано, что заметный вклад в рост величины ГИТ может вносить не только авроральный электроджет, но и мелкомасштабные вихревые токовые системы. Поэтому ГИТ представляют опасность и для технологических систем, ориентированных в направлении север-юг.

P_iЗ пульсациями на фоне суббури с вихревой структурой ионосферных токовых систем способны приводить к дополнительному росту величины ГИТ. Показано, что в отдельных случаях вариации ГИТ могут лучше коррелировать с вариациями геомагнитного поля, чем с его производной. Поэтому высокие значения ГИТ могут быть вызваны не только временными вариациями геомагнитного поля, но и пространственными вариациями вихревых токовых систем, связанных с продольными токами в магнитосфере.

Значительное по амплитуде геомагнитное возмущение не всегда приводит к большим значениям ГИТ. Пространственно-временное распределение максимума геомагнитных возмущений не всегда совпадает с пространственно-временным распределением максимума производной dX/dt . Поэтому проблема предсказания ГИТ далеко не всегда сводится к предсказанию мощного геомагнитного возмущения.

МОНИТОРИНГ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ В МУЛЬТИ-СПУТНИКОВОМ ПРОЕКТЕ «УНИВЕРСАТ-СОКРАТ»

А.В. Богомолов¹, М.И. Панасюк^{1,2}, С.И. Свертилов^{1,2}, В.В. Богомолов^{1,2}, А.Ф. Июдин¹, В.В. Калегаев¹, В.И. Оседло¹, В.Л. Петров¹, М.В. Подзолко¹, Е.П. Попова¹, И.А. Рубинштейн¹, В.И. Тулупов¹, И.В. Яшин¹

1 – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, aabboogg@sinp.msu.ru

2 – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет

Одна из основных задач проектируемой мультиспутниковой системы «Универсат-СОКРАТ» – оперативный мониторинг околоземной радиации, представляющей опасность для бортовых систем спутников: главным образом, потоков электронов и протонов радиационных поясов Земли, а также энергичных частиц солнечных космических лучей (СКЛ). Необходимость такого мониторинга обусловлена тем, что эти потоки даже в геомагнитно-спокойных условиях испытывают очень большие средне- и долгосрочные вариации, которые не могут быть описаны существующими статическими моделями радиационных поясов Земли.

Предполагается, что несколько малых спутников, оснащённых в частности многонаправленными спектрометрами протонов и электронов, будут выведены с помощью попутного запуска на специально подобранные орбиты и будут получать и оперативно передавать на землю экспериментальные данные, которые позволят в режиме, близком к «реальному времени», реконструировать текущую 3-мерную картину пространственного распределения радиации в значительной области околоземного пространства. В данном проекте ставится задача строить такую картину в основном для квази-спокойных геомагнитных условий или слабых магнитных возмущений, когда можно считать, что по крайней мере локально во времени (в течение десятков минут) движение энергичных заряженных частиц близко к адиабатическому.

Для построения 3-мерной картины текущего распределения потоков протонов и электронов в значительной области радиационных поясов Земли необходимы измерения, охватывающие больший диапазон L -оболочек (желательно вплоть до $L = 5-7$, т. е. до орбит GPS/ГЛОНАСС или геостационарной), и для каждой L -оболочки позволяющие реконструировать высотный ход потоков частиц в данный момент времени. В данном проекте предполагается задействовать низкие орбиты с большим наклоном, на которых должны осуществляться измерения всенаправленных потоков частиц в разных точках L -оболочки на разных высотах, и затем расчёт высотного хода всенаправленных потоков для всей L -оболочки путём интерполяции и экстраполяции данных измерений с использованием известных теоретических и эмпирических закономерностей высотного хода.

Для измерения всенаправленных потоков частиц предполагается использовать несколько детекторов типа телескопов, оси которых ориентированы под разными углами к вектору индукции магнитного поля. По таким измерениям можно путём аппроксимации построить питч-угловое распределение потоков частиц и рассчитать всенаправленный поток. При этом чрезвычайно высокая точность питч-угловых измерений не требуется. При этом телескоп для измерения энергетических спектров электронов и протонов должен представлять собой сборку, включающую несколько полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов разной толщины, расположенных один под другим на единой оси.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТИ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКОВ
СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПО ДАННЫМ SDO/AIA:
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗА 2010-2018 ГГ.**

Шугай Ю.С., Калегаев В.В., Нгуен М.Д., Бобровников С. Ю., Барина В. О.
НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, jshugai@srd.sinp.msu.ru

Для прогнозирования высокоскоростных потоков солнечного ветра (ВСП СВ) в режиме реального времени мы использовали систему обработки изображений Солнца, полученных на двух длинах волн 193 и 211 Å с космической обсерватории SDO/AIA, и эмпирическую модель прогноза скорости ВСП СВ на основе площадей корональных дыр. Результаты работы системы в режиме реального времени представлены на сайте НИИЯФ МГУ (http://swx.sinp.msu.ru/models/solar_wind.php?gcm=1).

В процессе работы системы была собрана база данных параметров корональных дыр и значений прогноза скорости СВ за 2010-2018 гг. Был проведен анализ ошибок прогнозирования с изменением солнечной активности в течение хода 24-го солнечного цикла при неизменных параметрах модели прогноза. Было получено, что качество прогноза скорости СВ по площадям корональных дыр, полученных на длине волны 193Å на 20 % лучше, чем на длине волны 211Å. Наилучший прогноз на длине волны 193Å (коэффициенты корреляции (КК) ~ 0.6, среднеквадратичные ошибки (СКО) меньше 90 км с-1) наблюдается в период спада солнечного цикла, начиная с 2016 года. Среднее по качеству прогнозы получены в период роста и первого максимума с 2010-2012 (КК ~ 0.5 СКО – меньше 90 км с-1). Наихудший прогноз был получен для периода второго максимума 2013-2015 году (КК ~ 0.3, СКО ~100 км с-1). При этом самый низкий коэффициент корреляции получен для 2014 года, который совпадает с максимумом солнечных пятен. Приведенные ошибки сравнимы с результатами, полученными Empirical Solar Wind Forecast (ESWF) и Wang-Argе-Sheeley (WSA) моделями за период 2011-2014 годов [1].

1. Reiss, M. A. et al., // Space Weather 2016. V14. P.495.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОНЕЧЁТКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ

Ефиторов А.О., Широкий В.Р., Мягкова И.Н., Доленко С.А.

НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия, a.efitorov@sinp.msu.ru, irina@srd.sinp.msu.ru

Одним из факторов космической погоды, непосредственно влияющим на работоспособность космических аппаратов (КА) на геостационарной орбите, являются потоки релятивистских электронов (РЭ) внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ). Выход из строя аппаратуры на борту КА может быть связан как с высокими значениями интегральных потоков (флуенсов) РЭ ВРПЗ за сутки или за более длительные периоды, так и с возрастаниями значений потоков, имеющими характерные временные масштабы в несколько часов. Поэтому практический интерес представляет как прогнозирование суточных флуенсов РЭ ВРПЗ с горизонтом от одних до нескольких суток, так и краткосрочное прогнозирование потоков РЭ ВРПЗ с горизонтом от 1 до 12 часов.

Существует известная, хотя и не однозначная, взаимосвязь между повышениями потоков РЭ ВРПЗ и геомагнитными возмущениями. Это означает, что на динамику потоков РЭ ВРПЗ могут оказывать влияние все известные факторы, влияющие на возникновение геомагнитных возмущений – параметры солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП), измеренные в точке Лагранжа между Землёй и Солнцем, предыстория этих параметров, геомагнитных индексов (Dst и Kp), значений самих прогнозируемых потоков, а также переменных, описывающих вращение Земли вокруг своей оси (а также вокруг Солнца).

К сожалению, столь сложная динамическая система, описываемая многомерным временным рядом, с физической точки зрения представляет собой весьма сложный динамический объект, адекватной универсальной физической модели для описания которого до сих пор не создано. В этих условиях возникают предпосылки для использования статистических регрессионных моделей и других адаптивных методов обработки данных.

В настоящей работе рассматривается краткосрочное прогнозирование потоков РЭ ВРПЗ с помощью так называемых адаптивных нейро-нечётких систем (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS). К числу известных преимуществ подобных систем относятся их универсальность и устойчивость к шумам и выбросам значений входных признаков, к числу их недостатков – большое количество адаптивно подбираемых параметров (весов ANFIS), что сильно усложняет обучение подобных систем при решении задач с высокой размерностью входных данных. К сожалению, рассматриваемая задача представляет собой задачу с погружением многомерного временного ряда на входе, что приводит к высокой размерности входных данных и необходимости специального исследования того, как именно следует применять ANFIS с учётом специфики решаемой задачи. Именно такому исследованию и посвящена настоящая работа.

Результаты, полученные с помощью нейро-нечётких систем, сравниваются с результатами прогнозирования, осуществляемого другими адаптивными методами: нейронными сетями типа многослойный персептрон с погружением временного ряда, рекуррентными нейронными сетями с долгой краткосрочной памятью (LSTM) и методом проекций на латентные структуры (ПЛС).

Работа выполнена в рамках госбюджетных тематик НИИЯФ МГУ 2.1 (115041410195) и 6.1 (01201255512).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Широкий В.Р., Ефиторов А.О., Мягкова И.Н., Доленко С.А.

НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия, shiroky@srd.sinp.msu.ru, irina@srd.sinp.msu.ru

Одной из важных прикладных задач физики магнитосферы является прогнозирование геомагнитной активности (ГА). Геомагнитные возмущения (часто называемые магнитными бурями) могут приводить к нарушениям радиосвязи, вызывать ухудшение в самочувствии некоторых людей, нарушения в работе крупных транспортных систем (энергосетей, линий электропередач и трубопроводов), повышение дозовой нагрузки пассажиров и экипажей самолетов, совершающих трансполярные межконтинентальные авиарейсы. Помимо этого, после сильных магнитных бурь возможно существенное возрастание (на порядок и более) потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли, что может повысить вероятность отказа аппаратуры на борту космических аппаратов, находящихся на геостационарной орбите. Всё это обуславливает существенное практическое значение прогнозирования ГА, причём не только долго- и среднесрочного, но и краткосрочного (на 1-6 часов вперёд).

Основными источниками геомагнитных возмущений могут являться корональные выбросы массы (КВМ), достигающие орбиты Земли, и высокоскоростные потоки солнечного ветра (СВ), в том числе рекуррентные. Прогнозирование ГА с горизонтом от 12 часов и более практически невозможно без учета информации об их источниках – активных областях и корональных дырах, получаемой из изображений Солнца. Краткосрочное прогнозирование на несколько часов вперёд возможно без использования такой информации, с учётом лишь данных о параметрах потоков СВ (прежде всего скорости и плотности) и значений компонент межпланетного магнитного поля (ММП), измеренных в точке Лагранжа L1 между Землёй и Солнцем. Отрицательное значение компоненты ММП B_z делает возможной передачу энергии от СВ в магнитосферу, и является необходимым (возможно, и достаточным) условием возникновения геомагнитного возмущения. Помимо этого, для успешного осуществления прогнозирования ГА необходим учет предыстории самой ГА и других параметров, описывающих магнитосферу Земли как сложную динамическую систему. В данной работе в качестве показателя ГА был выбран геомагнитный Dst-индекс.

Ввиду исключительной сложности магнитосферы Земли как физического объекта, разнообразия и большого числа факторов, влияющих на её состояние, адекватной физической модели, которая могла бы описать состояние магнитосферы Земли и позволить осуществить хотя бы краткосрочное прогнозирование ГА, до сих пор не создано. В этой ситуации могут быть использованы статистические аппроксимационные (регрессионные) модели, обучаемые на исторических данных, например, искусственные нейронные сети.

В настоящей работе краткосрочное прогнозирование ГА осуществляется с помощью нескольких нейросетевых архитектур: рекуррентных сетей с долгой краткосрочной памятью (LSTM), а также многослойных персептронов и вейвлет нейронных сетей (ВНС) с погружением временных рядов. Исследуются особенности ВНС и специфика их использования для решения рассматриваемой задачи.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тематик НИИЯФ МГУ 2.1 (115041410195) и 6.1 (01201255512).

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР В ЭПОХУ ПОНИЖЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Ишков В.Н.

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

Физические условия, сложившиеся в текущем солнечном цикле, современные методы обработки наблюдений и возможность отслеживать корональные дыры непрерывно на всей поверхности Солнца позволяют более подробно рассмотреть вопросы строения и эволюции корональных дыр и выявить характеристики, от которых зависит их геоэффективность. Ослабление общего магнитного поля Солнца в текущем солнечном цикле привело к значимому ослаблению магнитных полей всех активных образований и структур и, в том числе, в корональных дырах, высокоскоростные потоки солнечного ветра в текущем солнечном цикле не обеспечивают достаточного воздействия на околоземное космическое пространство для осуществления значимых геомагнитных возмущений. В докладе рассматриваются характеристики корональных дыр как общие для любых эпох солнечной активности, так и их специфические свойства, проявившиеся в эпоху пониженной солнечной активности. Учёт магнитных, геометрических и яркостных параметров корональных дыр в текущем солнечном цикле, открывшем эпоху пониженной солнечной активности позволяет выявить граничные параметры геоэффективности корональных дыр для раннего прогноза степени воздействия, связанных с ними высокоскоростных потоков солнечного ветра, на околоземное космическое пространство.

К ДОЛГОСРОЧНОМУ ПРОГНОЗУ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Ретеюм А.Ю.

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

Как показывает опыт последних лет, в деле обеспечения безопасности космических полетов существуют проблемы, обусловленные недостаточной разработанностью методов прогноза радиационной обстановки. Для лучшего понимания пространственно-временных особенностей поведения потоков заряженных частиц предлагается использовать детерминистический подход, суть которого заключается в изучении зависимости галактических космических лучей (ГКЛ) от движения планет и геомагнитных аномалий.

В долгосрочном плане особенно важно принимать во внимание модулирующий эффект внешних планет, в первую очередь Юпитера (рис. 1).

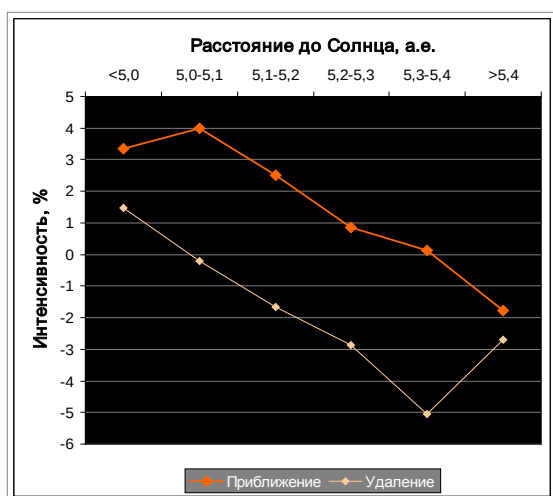


Рис. 1. Связь интенсивности ГКЛ с перемещением Юпитера, 1958-2018 гг.

Источник: расчет по данным Московского нейтронного монитора.

В околоземном пространстве на участке орбиты, расположенном над Южно-Атлантической аномалией, при активном Солнце резко повышается риск увеличения интенсивности ГКЛ. Знак и величина отклонения этого показателя во многом определяются положением Юпитера относительно земного экватора (рис. 2).

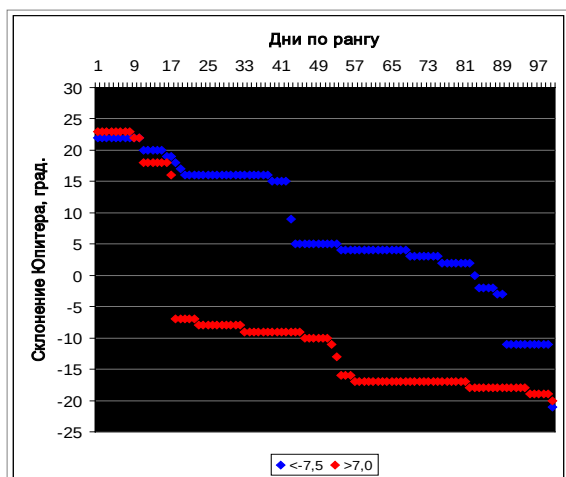


Рис. 2. Положение Юпитера в 100 случаях максимальной и минимальной разности суточных величин интенсивности ГКЛ на станциях Нуапсауо и Иркутск, 1958-1992 гг.

Источник: расчет по данным нейтронных мониторов Нуапсауо и Иркутска.

Установленные закономерности дают основание полагать, что в обозримом будущем уровень опасности космических полетов существенно повысится.

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Калегаев В.В., Бобровников С.Ю., Нгуен М.Д., Мягкова И.Н., Шугай Ю.С.

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

klg@dec1.sinp.msu.ru

В Центре данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ разработан прототип системы космического мониторинга для диагностики и прогноза радиационного состояния магнитосферы на основе данных наблюдений и моделирования. Система представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из подсистемы обращения к внешним источникам данных, подсистем расшифровки, первичной обработки и загрузки данных, системы управления базами данных, специализированного программного интерфейса для взаимодействия с базой данных, Web-сервера, операционных моделей и средств визуализации данных. Доступ к данным и результатам моделирования реализован через обновленный сайт (<http://swx.sinp.msu.ru/index.php>) с существенно переработанным интерфейсом. Страница «Состояние околоземного космического пространства» (http://swx.sinp.msu.ru/apps/geospace_now.php?lang=en&gcm=1) дает информацию об актуальных факторах космической погоды. На основе данных, поступающих в режиме реального времени создана система регистрации потенциально-опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве (ОКП). Система отслеживает четыре основных фактора ОКП: рентгеновское излучение Солнца (ИСЗ GOES primary), Кр-индекс, протоны на геостационарной орбите с энергией выше 10 МэВ (ИСЗ GOES primary) и электроны ВРПЗ с энергией выше 0.6 МэВ (ИСЗ Электро-Л2). Важной особенностью системы является использование данных измерений российских метеорологических спутников Электро Л2 и Метеор М2. На основе данных измерений полярного ИСЗ «Метеор-М №2», разработаны операционные сервисы, предназначенные для раннего предупреждения возрастаний потоков солнечных протонов в полярных шапках, и возрастаний потоков электронов релятивистских и субрелятивистских энергий в области внешнего радиационного пояса Земли. Операционные сервисы системы космического мониторинга дают среднесрочные (1-4 суток) прогнозы скорости солнечного ветра и суточных флюенсов релятивистских электронов внешнего радиационного пояса, а также краткосрочные прогнозы (1-2 часа) геомагнитных индексов и параметров солнечного ветра.

НОВАЯ МЕТОДИКА СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА МАГНИТНЫХ БУРЬ ПО АНАЛИЗУ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ТОЧКЕ ЛАГРАНЖА L_1

О.В. Хабарова¹, Т.Г. Когай², О.В. Мингалев²

¹*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия, olik3110@gmail.com*

²*Полярный геофизический институт, Апатиты, mingalev_o@pgia.ru*

Предложена новая методика среднесрочного прогноза магнитных бурь, являющаяся дальнейшим развитием прогноза магнитных бурь, базирующегося на изучении плазменных вариаций солнечного ветра в ULF диапазоне (1-3). За основу прогноза берётся эффект повышения вариабельности плотности и магнитного поля солнечного ветра перед приходом геоэффективных потоков. Новая методика позволяет прогнозировать развитие магнитных бурь различной природы как с внезапным, так и с плавным началом не менее чем за 12 часов по данным измерений параметров плазмы и магнитного поля солнечного ветра космическими аппаратами в точке Лагранжа L_1 .

Помимо вариаций плотности и магнитного поля, отраженных в вычислении производной концентрации по времени и суммы квадратов амплитуд вейвлет-гармоник с периодами 10-100 минут, расчет прогностической точки оповещения о буре (алерта) производится по плазменному параметру β и потоку энергичных частиц в диапазоне энергий от сотен кэВ до 5 МэВ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ [17-02-01328](#).

1. Хабарова О.В., Руденчик Е.А., Об особенностях изменения осцилляторного режима плотности солнечного ветра и магнитного поля Земли перед магнитными бурями - результаты вейвлет-анализа. Вестник отделения Наук о Земле РАН (ISSN 1819–6586), 1(21), 2003, <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/12013.html>
2. Khabarova O.V., Current Problems of Magnetic Storm Prediction and Possible Ways of Their Solving. Sun and Geosphere, 2(1), pp. 33-38, 2007, http://sg.shao.az/v2n1/SG_v2_No1_2007-pp-33-38.pdf
3. Khabarova O.V., and Yu.I.Yermolaev Solar wind parameters' behavior before and after magnetic storms., Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 70, 2-4, 2008, 384-390, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2007.08.024>

**КОЛЬСКАЯ АРКТИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРНАЯ СЕТЬ
ПОЛЯРНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА: ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Козелов Б.В., Сахаров Я.А., Федоренко Ю.В., Балабин Ю.В., Юрик Р.Ю., Григорьев В.Ф.
ФГБНУ «Полярный геофизический институт», Мурманск, boris.kozelov@gmail.com

Полярный геофизический институт - единственный институт данного направления в европейской части России, полностью расположенный и обладающей собственной научной инфраструктурой в Арктической зоне. Тематика научных исследований ПГИ соответствует Основным направлениям фундаментальных исследований “Программы фундаментальных научных исследований Российской академии наук”. Научная и прикладная деятельность ПГИ включает в себя разработку и передачу пользователям технических инноваций для высокоширотных гео- и радио- физических наблюдений, мониторинг геомагнитных вариаций в широком частотном диапазоне, мониторинг космических лучей, мониторинг атмосферы Арктики, наблюдения полярных сияний и другие задачи в области физики высоких широт, что обусловлено местонахождением Института.

Необходимость освоения Арктики увеличивает актуальность научных исследований в этом регионе. К таким исследованиям проявляют интерес организации из других регионов, однако они зачастую ограничиваются экспедиционными исследованиями, которые существенно менее продуктивны, чем исследования на основе регулярных стационарных наблюдений. Для организации таких наблюдений и исследований может быть использована имеющаяся научная инфраструктура ПГИ.

Интеграция научной инфраструктуры ПГИ в Кольскую Арктическую геофизическую инфраструктурную сеть (КАГИС ПГИ) имеет целью эффективное использование имеющейся научной инфраструктуры, обеспечение её доступности исследователям из других регионов. Для полноты в описание КАГИС ПГИ включена также обсерватория ПГИ "Баренцбург", находящаяся вне территории РФ, а также некоторые объекты в других регионах России, поддерживаемые ПГИ совместно с другими организациями.

В докладе представлено описание, состав КАГИС ПГИ, регламент доступа, возможные формы использования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ И РАЗЛОМОВ В ЛИТОСФЕРЕ НА ПОЛЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ПЕРЕДАТЧИКА

Мингалев И.В., Ахметов О.И., Суворова З.В., Мингалев О.В., Федоренко Ю.В.

ПГИ, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, mingalev_i@pgia.ru

В данной работе представлены результаты численного моделирования поля электромагнитного сигнала от искусственного передатчика с частотами 1-100 Гц в волноводе Земля-ионосфера. Длина передатчика около 100 км. Рассматриваются несколько вариантов распределения концентрации электронов в ионосфере, а также несколько вариантов распределения проводимости в литосфере, в том числе наличие разломов в ближней зоне передатчика. Обсуждается влияние концентрации электронов в ионосфере и распределения проводимости в литосфере на зависимость амплитуды сигнала в ближней зоне передатчика от частоты.

Для моделирования использовалась численная модель распространения низкочастотного электромагнитного сигнала в волноводе Земля-ионосфера. Модель основана на численном интегрировании системы уравнений Максвелла в проводящей среде. В литосфере ток определяется по закону Ома, а в ионосфере ток определяется из 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.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 17-01-00100.

ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ

**Мингалев И.В.¹, Мингалев О.В.¹, Мёрзлый А.М.², Мингалев В.С.¹, Клименко М.В.³,
Клименко В.В.³**

¹ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Мурманская обл., mingalev_i@pgia.ru

² Институт космических исследований, Москва

³ Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Калининград, Россия, e-mail: maksim.klimenko@mail.ru

В докладе рассматривается проблема полностью самосогласованного описания магнитного и электрического полей при моделировании крупномасштабных процессов в ионосфере. Получена система уравнений для этих полей, которая имеет эллиптический тип, не содержит частных производных по времени и определяет поля в области моделирования в приближении мгновенного дальнего действия по текущему распределению гидродинамических переменных каждой компоненты плазмы и граничным условиям с учетом силового равновесия электронов вдоль линий магнитного поля. В этой системе уравнений магнитное поле определяется уравнением Гаусса и уравнением Ампера. Плотность тока представлена как функция от магнитного и электрического полей, а также гидродинамических параметров ионов и электронов. Соленоидальная часть электрического поля определяется векторным уравнением Пуассона, в правой части которого стоит частная производная полного тока по времени, которая представлена как функция от магнитного поля и гидродинамических переменных каждой компоненты плазмы. Потенциальная часть электрического поля определяется из условия силового равновесия электронов вдоль линий магнитного поля. Рассматриваются системы уравнений, описывающие динамику F и E-слоев ионосферы. Обсуждаются схема численного интегрирования этих систем вместе с полученными уравнениями для полей.

Работа О.В., И.В. и В.С. Мингалевых выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 17-01-00100.

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА СОЛНЕЧНОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ

Обридко¹ В.Н., Абунин¹ А.А., Георгиева² К., Киров² Б., Шельинг¹ Б.Д., И.М.Лившиц¹

¹*ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия, obridko@izmiran.ru*

²*Space Research and Technology Institute - BAS, Sofia, Bulgaria*

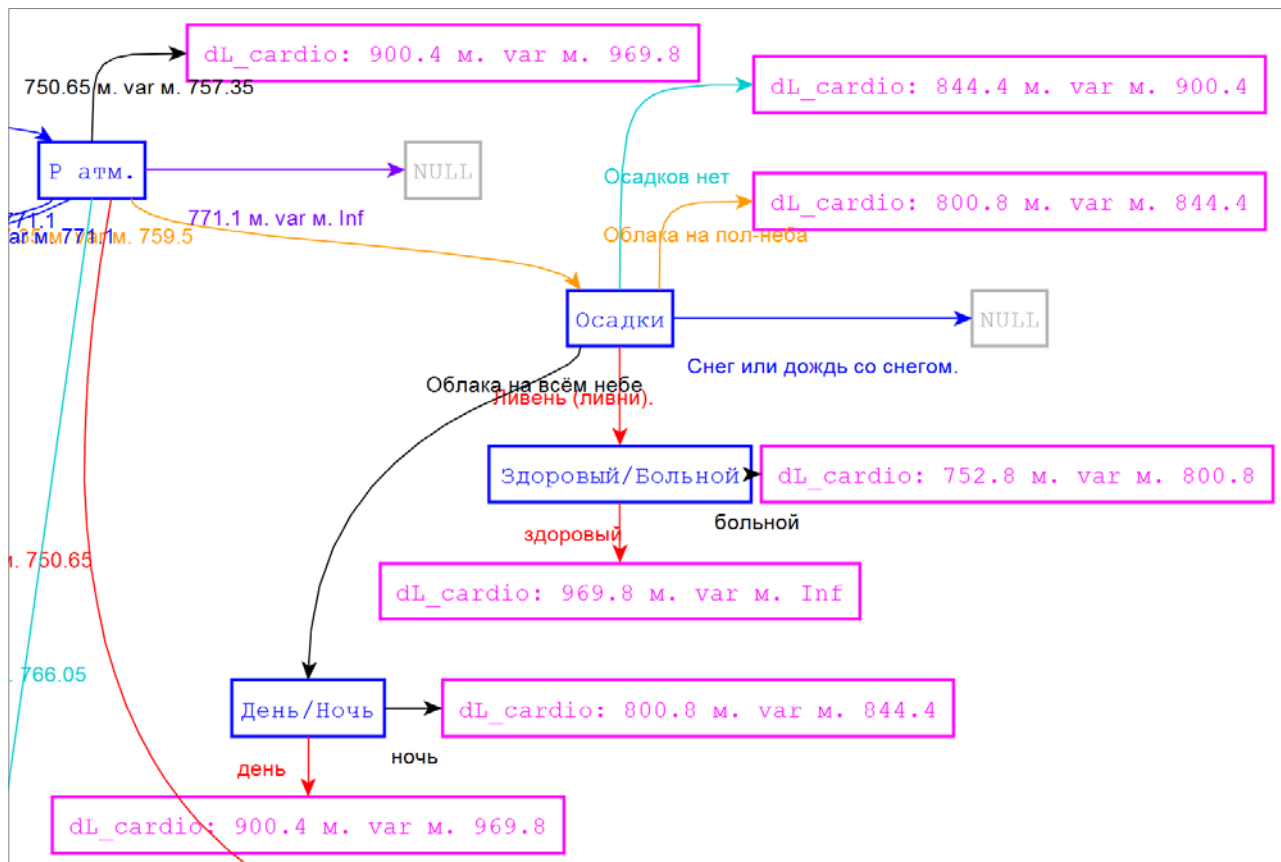
Можно ожидать, что начало XXI столетия будет характеризоваться одним или двумя циклами довольно низкой или почти низкой активности. Это обнаруживается как постепенное падение величины магнитного поля Солнца. Падение солнечной активности отслеживается и по характеру изменения связанных с Солнцем геофизических параметров (магнитные бури с внезапным и постепенным началом). В цикле работ авторов (Обридко и др., 2013; Киров и др., 2013, 2015, 2017; Георгиева и др., 2015, 2018) проанализированы различные геофизические индексы и их прогностическое значение. В настоящей работе подтверждено различие солнечных источников геомагнитных бурь с внезапным и постепенным началом. Для анализа были использованы три индекса – частота встречаемости и годовая сумма DST и продолжительности бури. По всем индексам подтверждено, что солнечные источники бурь с постепенным началом – это корональные дыры, частота появления которых смещена относительно максимума цикла на два-три года. Показательно, что индекс суммы DST не обнаруживает нарушения правила Гневывшева-Оля в отличие от других индексов солнечной и геофизической активности. Анализ среднегодовых значений показал наличие четко выраженного тренда, указывающего на спад активности, по крайней мере, начиная с 80-х годов прошлого столетия, и дает основания предположить, что мы находимся на нисходящей ветви векового цикла или в преддверии Гранд–минимума. Этот спад подтвержден анализом Форбуш-эффектов, скорости солнечного ветра и величины магнитного поля вблизи Земли.

НАПРАВЛЕННЫЙ ПОИСК МНОГОФАКТОРНЫХ УСЛОВИЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗМОЖНЫХ СЦЕНАРИЕВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ПРОТЕКАЮЩИХ В НЕЙ ПРОЦЕССОВ

Ожередов В.А.

ИКИ РАН, ozheredov2016@gmail.com

В гелиобиофизике и геофизике характер взаимосвязей исследуемых процессов носит нестационарный характер. Разработаны методы направленного многопараметрического поиска совокупности условий, при которых искомая зависимость наиболее выражена. Для выявления многофакторной зависимости между параметрами, одна часть из которых является категориальной, а другая – количественной, предложено использовать модифицированный алгоритм случайного леса (randomforest). Это позволяет проводить глубокий интеллектуальный перебор сценариев развития событий «если ... то» и находить те из них, при которых вероятность возникновения искомого эффекта превышает заданный порог. Ниже приводится фрагмент решающего леса, автоматически сгенерированный с помощью разработанного нами алгоритма визуализации решающих деревьев. В основе – данные Холтеровского мониторинга ЭКГ (продолжительность кардиоинтервала на ЭКГ-dL_cardio) и 9 факторов космической и земной погоды (Ратм, Татм, влажность, осадки, облачность, ветер, магнитное поле, время суток, состояние здоровья).



ГИТ В МАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ СЕНТЯБРЯ 2017г.

Сахаров Я.А.,¹ Селиванов В.Н.,² Зайцев А.Н.,³ Соколова О.Н.,⁴ Билин В.А.¹

¹ – Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия, sakharov@pgia.ru

² – Центр физико-технический проблем энергетики Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

³ – ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

⁴ – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Последовательность солнечных вспышек, в том числе редкие события вспышек класса X, корональные инжекции массы, резкие неоднородности в структуре солнечного ветра и высокоскоростные его потоки явились причиной необычной геомагнитной активности в сентябре 2017 года. Инфраструктура, развитая в Полярном геофизическом институте для проведения наземных наблюдений, позволила зарегистрировать разнообразные проявления активных процессов в магнитосфере Земли во время этих магнитных возмущений.

Нейтронный монитор в Апатитах зарегистрировал несколько форбуш-понижений, предваряющих развитие магнитосферных возмущений, повышение потока нейтронов, связанное с событием GLE72; геомагнитные вариации проявились в обсерватории Ловозеро; геоиндуцированные токи, регистрируемые на подстанциях магистральной линии электропередач Северный транзит, при развитии бури 7-8 сентября достигли своего максимального значения на подстанции Выходной за весь период проведения наблюдений. Последовательность скачков давления солнечного ветра 11 сентября вызвала возбуждение пульсаций Pc1, имевших сложный спектр, которые проявились в магнитном поле и в токах глухозаземленной нейтрали высоковольтных подстанций.

В докладе проводится обсуждение особенностей наземных проявлений геомагнитных возмущений, в первую очередь, развитие ГИТ на магистральной линии электропередач.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект р-а № [17-48-510199](#).

ВЫБОР ИНДЕКСА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ

В.Н. Шубин

ИЗМИРАН, г. Москва (г. Троицк), Россия, shubin@izmiran.ru

На основе базы данных, полученных с помощью спутников и наземных ионосферных станций, построена глобальная эмпирическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы. Входными параметрами этой модели являются географические координаты, UT, день, месяц, год и 3-х часовые индексы магнитной активности ap . В качестве входного параметра солнечной активности в этой модели могут использоваться различные солнечные или ионосферные индексы. Чтобы проверить модель и оценить ее полезность в ежедневных предсказаниях, мы использовали следующие солнечно-ионосферные индексы, определяемые на заданный день: R_{12} , $F10.7_{81}$, IG_{12} , T и интегральные индексы $F10.7\tau$, $F15.0\tau$, $F30.0\tau$ и $F8.0\tau$ который представляет собой ряд суточных значений индексов радиоизлучения на длинах волн 10.7 см, 15.0 см, 30.0 см и 8.0 см, соответственно, с экспоненциальным сглаживанием за время 1 оборота Солнца, предшествующего заданному дню. Параметр $\tau=0.96$ соответствует характерному времени ~ 27 дней. Рассчитанные величины $foF2$ были сравнены с наблюдаемыми данными ионосферных станций. Результаты проверки показали, что наименьшие ошибки RMSE были получены для вычислений модели с входными индексами T и $F10.7\tau$.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 17-05-00427) и Программой 28 Президиума РАН.

ОСОБЕННОСТИ МОДОВОЙ СТРУКТУРЫ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ НА ПРЕДЕЛЬНОЙ ДАЛЬНОСТИ ОДНОСКАЧКОВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

И.В. Крашенинников

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

Модовая структура волнового поля в краевой задаче ионосферного распространении радиоволн определяется следующими базовыми факторами: положением терминальных точек, уровнем солнечной активности и локальным временем в области средней точки радиотрассы. Уже на расстояниях в ~ 500 км, характерных для односкачкового распространения, сказывается кривизна земной поверхности. Так для мод слоя E ионосферы с характерным высотным максимумом 110 км дальность прохождения не превышает ~ 2200 км. Для F2-слоя определен специальный ионосферный параметр – $M3000F2$, который представляет собой отношение $MUF(3000)/foF2$, где МПЧ 1F2 – максимально-применимая частота на заданной дальности. Хотя односкачковая мода 1F2 может распространяться значительно дальше 3000 км (при благоприятных условиях до ~ 4500 км), дальность в 3000 км является параметром, характеризующим определенную однородность моды 1F2, в частности, существование нижнего луча и, следовательно, точки смыкания верхних и нижних лучей – МПЧ. Другим важным параметром, характеризующим перенос излучения, является наименьшая наблюдаемая (наименьшая применимая) частота – НМЧ, т.е. частота, на которой физически регистрируется волновое поле от излучателя (выделяется из фоновых электромагнитных шумов). НМЧ, в отличие от МПЧ, зависит от технических средств передачи-приема электромагнитных волн и от поглощения энергии волны ионосферной плазмой. По умолчанию предполагается, что в частотном интервале [НМЧ, МПЧ] при условии изотропного излучения и приема суммарное волновое поле существует на любой частоте и, как правило, монотонно возрастает вследствие уменьшения поглощения с ростом частоты (рис. 1, левая панель). Однако в условиях низкой солнечной активности для дневного времени суток может реализоваться ситуация, когда волновое поле имеет провал внутри интервала существования [НМЧ, МПЧ] – рис. 1, правая панель, что может приводить к понижению надежности и достоверности работы ионосферных линий связи.

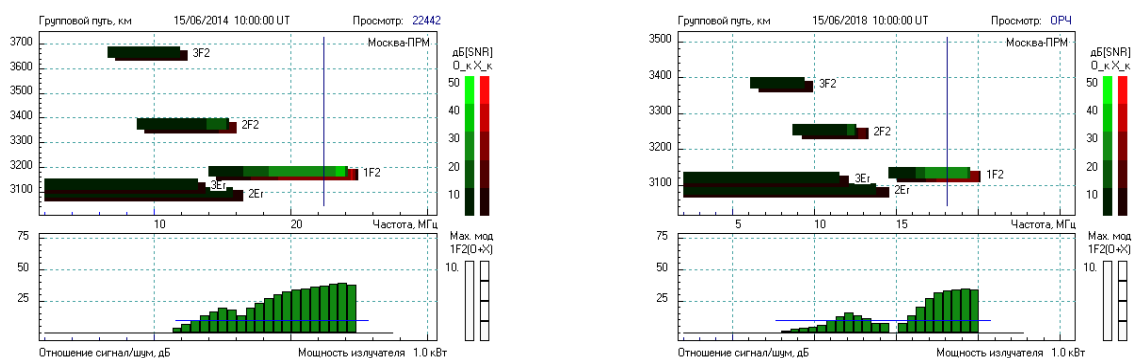


Рис. 1. Модовая структура волнового поля на дальности 3000 км меридионального направления в модели IRI+SDI для высокой ($R \sim 110$, 10:00 UT, июнь 2014 г.) и низкой ($R \sim 10$, 10:00 UT, июнь 2018 г.) солнечной активности. Мощность излучения 1 кВт, антенны – изотропные.

Крашенинников И.В. Модель IRI в задаче оценки энергетических характеристик волнового поля в ионосферном распространении радиоволн // Гелиогеофизические исследования, выпуск 17, ИПГ, Москва, 2018. С. 1-6.

ВКЛАД ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В РАДИАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ НА ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЭПРОН.

Золотарев И.А., Бенгин В.В., Юшков Б.Ю., Кузнецов Н.В.

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

Тяжелые заряженные частицы вызывают сбои в работе электронных компонентов космических аппаратов. Характеристика вероятности сбоев в первую очередь зависит от потока заряженных частиц с известной ЛПЭ[1]. Разработчики космической техники расчеты вероятности сбоев проводят по данным моделей ГКЛ и СКЛ. Благодаря новым данным ДЭПРОН появилась возможность сравнить эти расчеты с реальными спектрами.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 17-29-01022 офи_м.

1. Berg, M., Label, K., Campola, M., & Xapsos, M.// 2017 Characterization of System Level Single Event Upset (SEU) Responses using SEU Data, Classical Reliability Models, and Space Environment Data.

2. Sierawski, B. D., Warren, K. M., Sternberg, A. L., Austin, R. A., Trippe, J. M., McCurdy, M. W., ... & Massengill, L. W. (2017). CubeSats and Crowd-Sourced Monitoring for Single Event Effects Hardness Assurance. IEEE Transactions on Nuclear Science, 64(1), p. 293-300.

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ТОКОВ ПО ДАННЫМ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ЦЕПОЧКИ МАГНИТОМЕТРОВ

Евдокимова М.А., Петрукович А.А.

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

В работе исследуются модели восстановления профиля западного электроджета по данным магнитного поля меридиональной цепочки магнитометров. Эта задача представляет интерес в связи с тем, что данные магнитного поля известны в конечном, довольно небольшом количестве точек. Сделан обзор существующих линейных моделей и показана их применимость на сети IMAGE. В первой модели [1] токи представляются в виде бесконечно тонких проводов. Во второй [2] электроджет моделируется последовательностью узких бесконечно длинных полос. Оптимальной является модель с большим числом равномерно проводов (полос). Однако, большое число параметров (токов) приводит к большим ошибкам, и на более разреженной сети станций описанные методы плохо применимы. Для малого количества станций оптимальной является нелинейная модель с малым числом некоррелированных параметров. Была построена модель одной полосы с тремя параметрами и проведен ее тест на малом количестве станций. Показано, как положение станций относительно границ электроджета влияет на параметры модели. Ширина электроджета и плотность тока может варьироваться в зависимости от взятых станций, однако, полное значение тока меняется не сильно. Существенной проблемой использования нелинейной модели, особенно в случае сравнимого количества измеряемых величин и свободных параметров и наличии станций только по одну сторону электроджета, является «сваливание» алгоритма в локальный экстремум, который, как правило, находится далеко от абсолютного и имеет мало отношения к действительности. Для решения этой проблемы было проведено вычисление на случайном множестве начальных значений параметров, распределенных около априорного значения [3]. Правильный экстремум находится «большинством голосов» всех вариантов или по максимуму функции правдоподобия.

1. Kotikov A. L., Latov Yu. O., Troshichev O. A., Structure of auroral electrojets by the data from a meridional chain of magnetic stations, *Geophysica*, 1987, V. 23, P. 143-154.
2. Popov V. A., Papitashvili V. O., Watermann J. F., Modeling of equivalent ionospheric currents from meridian magnetometer chain data, *Earth Planets Space*, 2001, V. 33, P. 129-137.
3. Starkov G. V., Mathematical model of the auroral boundaries, *Geomagnetism and Aeronomy*, 34, 3, 80-86, 1994 (in Russian)

ПРОГНОЗ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ПО ДАННЫМ МИРОВОЙ СЕТИ СТАНЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Козлов В.И.

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

По изучению «групповых» особенностей поведения космических лучей исследуется переходный режим в окрестности фронта межпланетной ударной волны, что важно для выявления ее предвестника. Выбор методологии изучения переходного режима определился нижеследующими результатами. По часовым значениям интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) ст. Оулу (Финляндия) за 45 лет с 1968-2012 гг. определялось число «событий» - понижений интенсивности ГКЛ (обусловленных выбросами корональной плазмы) фиксированной амплитуды. Так был выявлен степенной характер распределения числа событий (эффектов Форбуша) в зависимости от их амплитуды, что согласуется с результатом, полученным ранее рядом авторов для рентгеновских вспышек. На это указывает близость их степенных показателей τ : “-1,60” для рентгеновских вспышек и “-1,56” для космических лучей.

Наличие степенной зависимости это, как известно, признак того, что динамическая система находится в нетривиальном состоянии «самоорганизованной критичности», когда весьма нерегулярно, т.е. катастрофически (что существенно осложняет прогноз) стравливается избыток запасенной в системе энергии. Вычисленное значение $\tau = -1,56$ согласуется с полученным нами ранее конечным и низким значением корреляционной (фрактальной) размерности $d \approx 2,5-3$ процесса на активной фазе солнечного цикла. Это следует из выражения для связи фрактальной размерности со степенным показателем $d = \tau + 1$. Применительно к задаче прогноза солнечной активности сам факт обнаружения низкоразмерного, т.е. частично-детерминированного процесса на активной фазе 11-летнего солнечного цикла служит своеобразной «теоремой существования», т.е. указанием на принципиальную возможность предсказания активной фазы солнечного цикла.

Словосочетание: «существенно осложняет прогноз», в более категоричной форме может означать и принципиальную непредсказуемость подобных катастроф!? Даже если это и так, то у нас, тем не менее, имеется возможность упредить их приход на орбиту Земли, используя мониторинг состояния среды с целью ранней их диагностики, что обязывает нас, образно говоря, постоянно «держат руку на пульсе». Осознание этого и определило необходимость разработки и создания системы наземного мониторинга космических лучей в полярной обсерватории Тикси еще в 1981 году. С учетом полученного опыта, в последнее время нами была разработана и создана экспертная система мониторинга и прогноза Cyber-FORSHOCK в режиме **реального времени** (<http://www.forshock.ru/pred.html>) по оперативным данным международной сети высокоширотных станций космических лучей (<http://www.nmdb.eu>).

В итоге установлено, что достаточным условием для регистрации предвестника ударной волны в ГКЛ - коррелированных флуктуаций (эффект ГАЛО в космических лучах) - является наличие ударной волны. Этот вывод подтверждается данными прямых измерений: «эффект гало» в большинстве случаев регистрируются при наличии достаточного ($\geq 15nT$) возмущения межпланетного магнитного поля (ММП), градиентов скорости и плотности плазмы солнечного ветра. Наиболее ярко «эффект гало» в ГКЛ проявляется для мощных вспышек на краю солнечного диска, как это было в экстремальном событии 4 ноября 2003 г. и особенно для мощных залимбовых вспышек, например таких, как 23 июля 2012 г. или в недавнем событии 10 сентября 2017 г.

**МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ
АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ С ОРБИТ ОДНОВРЕМЕННО С ИЗМЕРЕНИЯМИ
ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ И ЕЕ РОЛЬ В ИССЛЕДОВАНИЯХ И КОНТРОЛЕ
УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В
ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ**

Кузьмин А.К.¹⁾, Вайсберг О.Л.¹⁾, Шестаков А.Ю.¹⁾, Шувалов С.Д.¹⁾, Крученицкий Г.М.²⁾, Потанин Ю.Н.²⁾, Моисеев П.П.³⁾, Баныщикова М.А.⁴⁾

¹⁾ИКИ РАН,

²⁾ЦАО Росгидромет,

³⁾НПП Астрон Электроника,

⁴⁾Томский Государственный Университет, alkkuzmin@mail.ru

Результаты орбитальных и наземных комплексных исследований, проводимых в последнее десятилетие, показали, что вся полярная ионосфера (как северный авроральный овал, так и южный, включая касп и полярные шапки) Земли – это естественная лаборатория для изучения механизмов мерцаний (флуктуаций) радиосигналов на частотах навигационных систем, периодически пересекающих дрейфующие неоднородности электронной концентрации и авроральные структуры разных масштабов на разных высотах (от 100 до 400 км) в разных условиях ММП и особенно во время геомагнитных возмущений. Представляются предварительные характеристики разрабатываемых приборов перспективного малого аппаратного комплекса «Аврора»[1], элементы методики наблюдений авроральных процессов и диагностики состояния полярной ионосферы с орбит малых КА. Рассматриваются технические требования к КА и служебной аппаратуре со стороны научного приборного комплекса, и к параметрам их орбит и ориентации. Рассматриваются методические возможности реконструкций структур авроральных эмиссий, получаемых с орбит и поверхности Земли, и локальных характеристик ионосферы. Анализируются примеры результатов, полученных с аппаратных аналогов на зарубежных малых КА и наземных оптических комплексов, нацеленных на исследования процессов в полярной ионосфере, диагностику состояния ее характеристик в локальных секторах MLT.

1. Кузьмин А.К., Вайсберг О.Л., Шестаков А.Ю., Шувалов С.Д., Моисеев П.П., доклад на Симпозиуме «Современные проблемы создания российских малых космических аппаратов и их использования для решения социально-экономических задач», секция А., Калуга, 18-19 сентября 2018.

ВОЗМОЖНЫЕ КРАТКОСРОЧНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА СТАНЦИЯХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Легенька А. Д., Корсунова Л. П., Хегай В. В.

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

Исследования сейсмогенных возмущений в ионосфере ведутся по двум направлениям: детальное изучение каждого отдельного землетрясения и его влияния на ионосферу в различных регионах Земли [1] и статистический анализ эффектов ряда землетрясений в какой-либо одной сейсмоактивной зоне [2]. И хотя каждое землетрясение уникально, все же оказалось возможным выделить наиболее характерные особенности возмущений ионосферы, предшествующих землетрясениям (ВИПЗ) с тем или иным временем упреждения [3].

В работах [4, 5] было показано, что времена упреждения моментов землетрясений (ΔT) ионосферными возмущениями (ВИПЗ) составляют от одного дня до нескольких недель в зависимости от магнитуды готовящегося землетрясения и расстояния от пункта наблюдения до эпицентра. Эти ВИПЗ могут быть ионосферными предвестниками землетрясений (ИПЗ) различной срочности (в частности, среднесрочными – СИПЗ или краткосрочными – КИПЗ). Однако наибольшую практическую значимость представляют КИПЗ, которые появляются за сутки – трое до землетрясения и могут быть использованы в дальнейшем в целях прогнозирования крупных сейсмических событий как один из элементов в общей картине аномалий в других геофизических полях перед землетрясениями.

Целью настоящей работы являлось выделение возможных КИПЗ, предшествующих землетрясениям с $M \geq 6.5$, с временным упреждением от нескольких часов до 3 сут по данным разнесенных наземных станций вертикального зондирования ионосферы (НСВЗИ) в регионе Японии.

Анализ изменений ионосферных параметров слоев E_s и F_2 в течение трех дней, предшествующих сильным коровым землетрясениям с $M = 6.5 \div 7.4$, по наблюдениям на разнесенных НСВЗИ в регионе Японии позволил выделить следующие особенности, присущие вероятным краткосрочным ионосферным предвестникам землетрясений (КИПЗ):

1. Предполагаемые КИПЗ представляют собой отклонения в частотных параметрах слоев E_s и F_2 от фоновых спокойных значений на величину не менее 20%, а по действующей высоте спорадического слоя E_s – более 30 км для эпицентральных расстояний ~ 300 км.
2. Аномальные изменения указанных ионосферных параметров отмечаются в одни и те же сутки на НСВЗИ, разнесенных на несколько сотен километров.
3. Время упреждения момента подземного толчка вероятными КИПЗ в основном определяется энергией готовящегося землетрясения и возрастает с увеличением его магнитуды M . Максимальное время упреждения сейсмического удара для землетрясений в указанном диапазоне магнитуд составляет 2.5 сут.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 01201361524 по теме “Исследование солнечной активности и физических процессов в системе «Солнце-Земля»”.

1. Hobara Y., Parrot M. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2005. V. **67**. N 7. P. 677.
2. Liu J. Y., Chen Y. I., Chuo Y. J., Chen C. S. // J. Geophys. Res. 2006. V. **111**. N A05304.
3. Korsunova L. P., Hegai V. V. // Open Trans. on Geosci. (GEOS). 2014. V. **1**. N 1. P. 25.
4. Корсунова Л. П., Хегай В. В. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. **48**. № 3. С. 407.
5. Perrone L., Korsunova L. P., Mikhailov A. V. // Ann. Geophysicae. 2010. V. **28**. N 4. P. 941.

**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
УДЕРЖАНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ГЕОМАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ**

Широков А.Е., Жмайло В.А., Залялов А.Н., Иванов Н.В., Никитина А.А., Перминов А.В., Сулейманов М.Н., Тренькин А.А., Цицилин П.А., Шибитов Ю.М.

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия, aeshirokov@vniief.ru

Исследования физических процессов, сопровождающих формирование и динамику радиационных поясов Земли (РПЗ) делятся уже несколько десятилетий. Качественно понятна комплексная взаимосвязь удерживаемых в РПЗ заряженных частиц, электромагнитных волн и штормов в магнитосфере. Однако детальное, точное и достоверное численное моделирование (в частности, быстропротекающих, длительностью в несколько минут - часов) процессов в РПЗ стало возможным в последнее десятилетие в связи с развитием соответствующих суперкомпьютерных методик, которые в свою очередь требуют верификации, в том числе с использованием лабораторного моделирования.

В докладе кратко описываются развиваемые физические модели и соответствующие многопроцессорные методики численного моделирования, используемые для расчета изменения характеристик релятивистских электронов, захваченных геомагнитным полем в РПЗ. Они позволяют проводить расчеты динамики РПЗ на временных масштабах от нескольких секунд до нескольких лет и учитывают широкий спектр электромагнитных волн в плазме магнитосферы, определяющих диффузию электронов в РПЗ, а также изменение их энергии и высыпание в атмосфере. Представляется первый этап лабораторного моделирования удержания высокоэнергетичных электронов в протяженной магнитной ловушке на плазменном стенде «НПМ-01» (РФЯЦ-ВНИИЭФ, г.Саров), а также соответствующая расчетно-теоретическая интерпретация.

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКИХ И ЭНТРОПИЙНЫХ МОД В ОПТИЧЕСКИ ТОНКИХ СРЕДАХ С ТЕПЛОВЫМИ НЕУСТОЙЧИВОСТЯМИ

Завершинский Д.И., Молевич Н.Е.

Самарский университет, СФ ФИАН, г. Самара, Россия, dimanzav@mail.ru

Отличительной особенностью таких оптически тонких сред как межзвездный газ и корональная плазма является зависимость процессов их нагрева и радиационного охлаждения от температуры и плотности самих сред. Наличие зависимости неадиабатических процессов от термодинамических параметров среды приводит к тому, что в среде появляется обратная связь между возмущением и средой, способной впоследствии приводить к усилению возмущения, либо к его дополнительному затуханию, в зависимости от конкретных параметров среды. Вопрос о том, каким образом неадиабатические процессы способны влиять на эволюцию волн в среде, на данный момент полностью не изучен и является предметом текущего исследования.

В связи с тем, что в данной работе, мы сфокусировали основное внимание на роли процессов нагрева и радиационного охлаждения на динамику волн, влияние иных диссипативных и/или дисперсионных процессов на волны не рассматривалось. В качестве исходной системы в работе была использована система уравнений газодинамики, описывающая однородную среду и учитывающая влияние нагрева и охлаждения в форме обобщенной функции теплотерм [1]. Данная система уравнений способна описывать как распространение акустических волн в межзвездном газе, так и распространение медленных магнитоакустических волн, вдоль магнитного поля в корональной плазме.

Линейный анализ исходной системы уравнений в одномерном виде позволяет получить дифференциальное уравнение в частных производных, третьего порядка по времени и второго порядка по пространственной координате. Данное уравнение описывает две акустические и одну энтропийную волну в среде и может быть использовано для определения дисперсионных свойств данных волн [2]. В текущей работе впервые было получено точное аналитическое решение задачи Коши для данного уравнения. В качестве граничных условий были использованы граничные условия Дирихле первого рода. На основе полученного решения был получен ряд новых результатов:

Во-первых, было показано, что эволюция волн существенно зависит не только от формы исходного возмущения, но и от его типа. В частности, возмущение только плотности способно породить бегущие акустические волны, что невозможно в среде без теплотерм. Во-вторых, распределение энергии по гармоникам акустических волн в исходном возмущении существенно отличается от случая сред без теплотерм. В частности, исходное гауссово возмущение может распасться на два ассиметричных сигнала, в связи с тем, что в исходном возмущении энергия распределялась также и на энтропийную волну. Также важно отметить, что в зависимости от модели источника может возникнуть зона запрещенных частот. Волны с частотами, принадлежащими данной области не распространяются в среде. Кроме того, было показано, что зависимостью от частоты обладает не только фазовая скорость и инкремент акустических волн, но и начальная фаза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта РФФИ 18-32-00344.

1. Field G.B. // Astrophysical Journal 1965. V. **142**. P. 531.

2. Molevich, N.E, Zavershinsky D.I., Galimov R.B., Makaryan V.G. // Astrophysics and Space Science 2011. V. **334**. № 1. P. 35.

МАТРИЧНЫЙ АЛГОРИТМ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ ВОЛНОВЫХ УРАВНЕНИЙ В ПЛОСКОСЛОИСТОЙ МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ

Мизонова В.Г.

НГТУ, г. Нижний Новгород, Россия, vermiz@mail.ru

Рассмотрена задача о распространении электромагнитной волны в плоскостойкой неоднородной холодной магнитоактивной плазме. Предложен приближенный алгоритм решения волновых уравнений в произвольном случае наклонного падения. Суть алгоритма заключается в последовательном нахождении обусловленных неоднородностью среды поправок к локальным корням дисперсионного соотношения и локальным векторам поляризации. При этом система дифференциальных уравнений сводится к системе алгебраических уравнений, что существенно упрощает как аналитическое, так и численное рассмотрение. Предложенный алгоритм удобен прежде всего для проведения численных расчетов. В частности, переход от дифференциальных уравнений к алгебраическим позволяет избежать проблемы численной расходимости решений из-за больших декрементов затухания нераспространяющихся мод.

Выяснены условия применимости алгоритма. Алгоритм применим в том числе в случае слабо неоднородной плазмы, то есть если длины волн распространяющихся мод и декременты затухания нераспространяющихся мод малы по сравнению с масштабом плазменной неоднородности, и все локальные корни дисперсионного соотношения существенно различны. Отмеченные требования аналогичны условиям применимости приближения геометрической оптики. В отличие от геометрического подхода, рассмотренный алгоритм позволяет учесть слабый эффект линейного взаимодействия мод.

В качестве примера использования матричного алгоритма рассмотрена задача об отражении плоской монохроматической волны от слоя неоднородной плазмы. Получены общие выражения, связывающие коэффициенты отражения волны на нижней и верхней границах слоя. Приведены примеры численных расчетов для коэффициента отражения по энергии свистовых волн, падающих на ионосферу сверху. Для расчетов были использованы высотные профили плазменной концентрации и частот столкновений электронов и ионов с нейтральными частицами, соответствующие типичным дневным условиям среднеширотной ионосферы. Вычисления проводились матричным алгоритмом и с помощью формул геометрической оптики. Сравнение результатов показывает, что в первом случае значения коэффициента отражения оказываются несколько ниже. Это, вероятно, связано с эффектом линейной трансформации волн, при котором часть энергии перекачивается от распространяющихся мод к нераспространяющимся. С ростом частоты эффект линейной трансформации уменьшается, и коэффициенты отражения, полученные разными методами, становятся практически одинаковыми.

Принцип приближенного решения волновых уравнений рассмотрен для случая холодной магнитоактивной плазмы, однако полученный метод может быть обобщен на случай произвольной плоскостойкой анизотропной среды. В частности, матричный алгоритм поправок может быть полезен для численных расчетов коэффициентов отражения и коэффициентов линейной трансформации волн в плавно неоднородной ионосфере.

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ И АСИМПТОТИКИ НЕОДНОМЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ОБОБЩЕННЫХ УРАВНЕНИЙ КП-КЛАССА В ПЛАЗМЕ С ПЕРЕМЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Белашов В.Ю.¹⁾, Белашова Е.С.²⁾, Харшиладзе О.А.³⁾

¹⁾КФУ, г. Казань, Россия, vybelashov@yahoo.com

²⁾КНИТУ-КАИ, г. Казань, Россия, bel_lena@mail.ru

³⁾ТГУ, г. Тбилиси, Грузия, o.kharshiladze@mail.ru

Методами качественного и асимптотического анализа изучается структура и асимптотики 2D и 3D солитонов и нелинейных волновых пакетов в комплексных средах в рамках модели обобщенного уравнения Кадомцева-Петвиашвили (ОКП) с переменной дисперсией [1]:

$$\partial_t u + A(t, u)u = f, \quad f = \kappa \int_{-\infty}^x \Delta_{\perp} u dx, \quad \Delta_{\perp} = \partial_y^2 + \partial_z^2, \quad (1)$$

$$A(t, u) = \alpha u \partial_x - \partial_x^2 (v - \beta \partial_x - \delta \partial_x^2 - \gamma \partial_x^3),$$

которая при $\beta = 4\pi nT / B^2 \ll 1$ и $\omega < \omega_B = eB / m_i c$, $k\lambda_D \ll 1$ описывает распространение БМЗ волн в замагниченной плазме с $k_x^2 \gg k_{\perp}^2$, $v_x \ll v_A$. При этом, $u = h = B_{\sim} / B$ – безразмерная амплитуда поля волны, $\alpha = \frac{3}{2} v_A \sin \theta$, $v_A = B / \sqrt{4\pi n m}$, $m = m_e + m_i$, $\kappa = -v_A / 2$; функции $\beta, \gamma = f(v_A, \theta)$, где $v_A = \varphi[B(t, \mathbf{r}), n(t, \mathbf{r})]$, $\theta = (\mathbf{k} \wedge \mathbf{B})$: $\beta = v_A (c^2 / 2\omega_{0i}^2) (\cot^2 \theta - m_e / m_i)$, $\gamma = v_A (c^4 / 8\omega_{0i}^4) [3(m_e / m_i - \cot^2 \theta)^2 - 4 \cot^4 \theta (1 + \cot^2 \theta)]$. Подобная ситуация имеет место для ионно-звуковых (ИЗ) волн в столкновительной пылевой плазме, когда в отсутствие диссипации и вариаций заряда пылевых частиц закон дисперсии имеет вид $\omega = kV_s$, где $V_s = \sqrt{(T_e / m_i)(n_{i0} / n_{e0}) + T_i / m_i}$ – скорость ионного звука в бездиссипативной плазме с постоянным зарядом пыли. Очевидно, что дисперсия будет переменной в случае пространственно-временных вариаций плазменных компонент (например, в случае неоднородного распределения пыли в пространстве). В этом случае соответствующие уравнения будут подобны уравнениям для ИЗ поверхностных волн.

Уравнения класса (1) не являются в общем случае полностью интегрируемыми, и вопрос структуры их неодномерных солитонных решений требует специального исследования, которое проводится на основе методов качественного и асимптотического анализа [2]. Уравнение (1) записывается в виде динамической системы (системы обыкновенных дифференциальных уравнений) с переменными β и γ , и исследуется, в общем 3D случае, в 12D фазовом пространстве. При этом изучается трансформация фазовых портретов и изменение структуры решений (асимптотик) при изменении функций $\beta, \gamma = f(v_A, \theta)$ в соответствии с параметрами среды распространения. На основании полученных результатов строится классификация возможных неодномерных решений уравнений класса ОКП в зависимости от типа и параметров среды.

Полученные результаты соотносятся с найденными ранее (на основе анализа трансформационных свойств гамильтонианов соответствующих уравнений [3]) условиями устойчивости 2D и 3D решений уравнения ОКП.

1. Belashov V.Yu., Vladimirov S.V. Solitary Waves in Dispersive Complex Media. Theory, Simulation, Applications. Springer-Verlag GmbH & Co. KG, 2005. 305 p.
2. Белашов В.Ю., Белашова Е.С. Солитоны: теория, моделирование, приложения. Казань: РИЦ «Школа», 2016. 270 с.
3. Белашов В.Ю. // ДАН СССР 1991. Т. **320**. № 1. С. 85.

N-ВИХРЕВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ. КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ

Белашов В.Ю.¹⁾, Харшиладзе О.А.²⁾

¹⁾КФУ, г. Казань, Россия, vybelashov@yahoo.com

²⁾ТГУ, г. Тбилиси, Грузия, o.kharshiladze@mail.ru

Одной из наиболее важных проблем в исследовании динамики вихревых структур в сплошных средах является изучение характера их взаимодействия и, в частности, поиск состояний, когда система вихрей сохраняет свою устойчивость [1]. В этой связи важно иметь возможность прогноза результата эволюции вихревых систем в зависимости от значений параметров, описывающих их начальное состояние. В настоящей работе, на основе обработки результатов многочисленных экспериментов по моделированию эволюции и взаимодействия систем вихревых областей конечной площади (ВОКП или, в англ. терминологии, FAVR's или V-states), вводится специальный обобщенный критический параметр, который позволяет предсказывать качественный характер взаимодействия ВОКП. Так для парно взаимодействующих ВОКП мы определили некоторую функцию ξ , имеющую смысл критического параметра, который однозначно определяет качественный характер их взаимодействия. Сравнивая значение ξ , полученное для некоторой начальной конфигурации системы ВОКП, с его критическим значением ξ_{cr} , мы можем предсказать результат взаимодействия вихревых структур, а именно: если $\xi < \xi_{cr}$, тогда хорошо известный из экспериментов режим "фазового перемешивания" ВОКП при их взаимодействии наблюдаться не будет, в противном же случае, когда $\xi \geq \xi_{cr}$, результатом эволюции вихревой системы будет слияние вихрей с последующим формированием завихренностей более мелких масштабов. Для вихрей круговой и эллиптической (или близкой к эллиптической) формы значение обобщенного критического параметра $\xi_{cr} = 2.129$ отвечает точке фазового перехода [1].

Нами было выполнено большое число серий численных экспериментов по изучению двухвихревого взаимодействия, взаимодействия N -вихревых систем, включая взаимодействие между вихревыми структурами и пылевыми частицами в плазме, а также взаимодействие 3-мерных плоско вращающихся вихревых структур в рамках плоскостной модели среды [2]. Исследовались приложения полученных результатов к динамике вихревых структур в атмосфере, гидросфере и плазме [3], в частности: задача эволюции синоптических и океанических вихрей циклонального типа, которые могут рассматриваться, как фронт завихренности, взаимодействие в вихре-пылевых системах, а также динамика заряженных нитей, представляющих собой потоки заряженных частиц в однородном магнитном поле в рамках 2-мерной модели плазмы Тэйлора-Макнамара.

Полученные результаты, наряду с их очевидной значимостью для адекватной интерпретации эффектов, связанных с турбулентными процессами в газах и жидкостях (в частности, квазигеострофических вихревых движений в атмосфере и океане с учетом кориолисовых сил), могут быть весьма полезны при описании турбулентных процессов в космической плазме (например, при описании плазмы непрерывной моделью или моделью кулоновски взаимодействующих квазичастиц и заряженных "нитей"), а также при изучении динамики альфвеновских вихрей в ионосферной и магнитосферной плазме.

1. Belashov V.Yu., Belashova E.S., Kharshiladze O.A. Nonlinear Wave Structures of the Soliton and Vortex Types in Complex Continuous Media: Theory, Simulation, Applications // Lecture Notes of TICMI. Vol. 18 / Ed. G. Jaiani. Tbilisi: Tbilisi University Press, 2018. 90 p.
2. Belashov V.Yu., Kharshiladze O.A. // J. Astrophysics and Aerospace Techn. 2018. V. 6. P. 50.
3. Belashov V.Yu. // Adv. Space Research 2017. V. 60. P. 1878.

САМОВОЗДЕЙСТВИЕ ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ПЛАЗМЕ

Белов С.А., Молевич Н.Е., Завершинский Д.И.

Самарский университет, СФ ФИАН, г. Самара, Россия, mr_beloff@mail.ru

Применительно к вопросам ускорения солнечного ветра и нагрева солнечной плазмы может иметь значение не только взаимодействие альфвеновских волн с другими МГД-волнами, но и взаимодействие альфвеновской волны самой с собой («самовоздействие»). Подобное самовоздействие описывается векторным уравнением Козна-Кулсруда, следствием которого является укрупнение профиля альфвеновских волн большой амплитуды. Это укрупнение может приводить к образованию токовых слоев и, следовательно, потере энергии волной. В то же время в солнечной плазме присутствуют неадиабатические процессы нагрева и радиационного охлаждения, учет которых может существенно изменить динамику волн в рассматриваемых моделях. В частности, дисбаланс процессов нагрева и охлаждения может проявлять себя в виде изоэнтропической неустойчивости/устойчивости. Данный тип неустойчивости, относящийся к волновому типу неустойчивостей, оказывает непосредственное влияние на моды акустического типа, и, в частности, на магнитоакустические волны. Так в изоэнтропически неустойчивой среде магнитоакустические волны становятся неустойчивыми и могут усиливаться до больших амплитуд, в то время как альфвеновские волны остаются устойчивыми. Более того, в изоэнтропической среде возможны возникновение автоволновых импульсов и биэкспоненциальное усиление альфвеновских волн в результате параметрического взаимодействия с неустойчивыми магнитоакустическими волнами.

Рассмотрение распространения линейно поляризованных альфвеновских волн в тепловыделяющей плазме приводит к интегро-дифференциальному уравнению, описывающему самовоздействие альфвеновских волн в данном типе сред. В приближении квазигармонического сигнала данное уравнение сводится к скалярному уравнению Козна-Кулсруда с кубическим источником. Это уравнение может быть решено аналитически. Из решения данного уравнения следует, что укрупнение альфвеновских волн большой амплитуды в тепловыделяющей плазме может протекать со скоростью, отличной от скорости в плазме без тепловыделения. Вторым следствием является то, что альфвеновские волны могут усиливаться или затухать из-за наличия в уравнении кубического источника. В частности, в условиях изоэнтропической неустойчивости альфвеновские волны укрупняются быстрее и претерпевают увеличение амплитуды по сравнению с плазмой без тепловыделения. В случае изоэнтропической устойчивости наоборот происходит более медленное укрупнение и уменьшение амплитуды волны. Показано, что результаты исследования полученного нелинейного уравнения согласуются с результатами численного моделирования распространения линейно поляризованных альфвеновских волн в тепловыделяющей плазме на основе одномерной системы МГД-уравнений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта РФФИ 18-32-00344.

ХОРОВЫЕ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ: СОПОСТАВЛЕНИЕ ТЕОРИИ И НАБЛЮДЕНИЙ

Демехов А.Г.^{1,2}

¹ ПГИ, г. Апатиты, Россия

² ИПФ РАН, г. Н.Новгород, Россия, andrei@ipfran.ru

Дан краткий обзор результатов аналитических моделей и численных расчетов генерации хоровых ОНЧ излучений и их сопоставления друг с другом и с данными наблюдений. В частности, сравниваются различные подходы к аналитическим оценкам дрейфа частоты, инкремента нарастания волн и их характерной амплитуды, а также пространственно-временной картины эволюции поля в области генерации. Обсуждаются условия образования дискретных сигналов с разными знаками дрейфа частоты.

ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПАКЕТОМ ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫХ ВОЛН

Грач В.С.¹, Демехов А.Г.^{2,1}

¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, vsgrach@appl.sci-nnov.ru

²ПГИ, г. Апатиты, Россия

На основе численного решения уравнений движения частиц в заданном поле волнового пакета ионно-циклотронных волн, распространяющегося вдоль геомагнитного поля, анализируется эволюция функции распределения релятивистских электронов и их высыпания в конус потерь. Рассматриваются волновые пакеты конечной длины с переменной частотой и различными профилями амплитуды электрического поля: распределенной по закону Гаусса (гауссов пакет) и постоянной (прямоугольный пакет). Диапазон энергий, для которых условие циклотронного резонанса выполняется внутри пакета, определяется параметрами плазмы и частотой волны.

Известны три нелинейных режима взаимодействия: бунчировка (группировка пролетных частиц по фазе, вследствие которой сепаратриса, отделяющая на «мгновенной» фазовой плоскости пролетные частицы от захваченных, пересекается ими в окрестности седла), направленное рассеяние (сильное изменение питч-угла пролетных частиц из-за их длительного пребывания в области сепаратрисы вдали от седла) и захват частиц волной. В работах [1, 2] характеристики этих режимов анализировались для однократного пролета электрона через волновой пакет. В данной работе исследуется случай многократного пролета частиц через область взаимодействия.

Основные результаты работы следующие. В формировании потоков высыпающихся частиц все режимы взаимодействия (соответствующие различным начальным питч-углам) играют существенную роль. Высыпание вследствие квазилинейной диффузии имеет место только для гауссова пакета при достаточно высоких энергиях; в остальных случаях во всем диапазоне начальных питч-углов взаимодействие нелинейно. При малых начальных питч-углах это соответствует преобладанию бунчировки, которая приводит к перемещению частиц в область средних питч-углов. В этих случаях высыпание в конус потерь возможно за счет направленного рассеяния (для средних и больших начальных питч-углов для гауссового пакета, малых и средних питч-углов для прямоугольного) и захвата частиц полем волны (для больших питч-углов). Для прямоугольного пакета попадание частиц в конус потерь напрямую за счет захвата полем волны возможно только для меньших энергий; при больших энергиях частицы в режиме захвата перемещаются в ту область питч-углов, где эффективно направленное рассеяние.

Для высыпаний, обусловленных квазилинейной диффузией, поток высыпающихся частиц, полученный численно, несколько превышает значение, полученное из аналитических оценок на основе квазилинейной теории. Для высыпаний, обусловленных нелинейными режимами, для гауссового пакета поток высыпающихся частиц близок к значению, соответствующему предельному случаю сильной диффузии (в рамках квазилинейной теории), для прямоугольного – превышает это значение в несколько раз. В рассматриваемом диапазоне энергий величина потока высыпающихся частиц убывает с ростом энергии.

Форма амплитудного профиля волнового пакета существенно влияет на эффективность взаимодействия как качественно (при одних и тех же параметрах электронов разному профилю пакета соответствуют разные режимы), так и количественно (для частиц с фиксированной энергией поток высыпающихся частиц для прямоугольного пакета превышает поток для гауссового пакета в несколько раз).

1. Грач В.С., Демехов А.Г. Изв. ВУЗов. Радиофизика, 2017. Т. 60. № 12. С. 1052.
2. Грач В.С., Демехов А.Г. Изв. ВУЗов. Радиофизика, 2018. Т. 61. № 6. С. 441.

АВРОРАЛЬНЫЙ ХИСС И МАГНИТОСФЕРНЫЕ СУББУРИ В АВРОРАЛЬНЫХ ШИРОТАХ

Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Федоренко Ю.В., Громова Л.И., Турунен Т.

ИФЗ РАН, ИКИ РАН, г. Москва, Россия; обс.Соданкюля, Финляндия; ПГИ, г. Апатиты, ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия kleimen@ifz.ru

Проведен анализ геомагнитных условий во время появления всплесков ОНЧ аврорального хисса, зарегистрированных в северной Финляндии на станции Каннуслахто (КАН, $L \sim 5.5$) во время зимних кампаний 2013-2018 г.г. Всплески аврорального хисса (АХ) представляют собой последовательность серии относительно коротких (несколько минут) правополяризованных шумовых излучений на частотах выше 3-6 кГц с максимумом в полосе частот 8-10 кГц. Показано, что всплески АХ в КАН обычно наблюдаются в 19-01 MLT (17-23 UT) при небольшой геомагнитной активности ($K_p < 3$) и сопровождаются дугами полярных сияний, регистрируемых в обс Абиско (АВК), расположенной в 350 км к северо-западу от КАН. Согласно модельным представлениям во время появления всплесков АХ точка их наблюдения (КАН), как правило, находится в приэкваториальной области аврорального овала. Установлено, что всплески АХ являются типичным элементом подготовительной фазы (growth phase) магнитосферной суббури, с началом которой и появлением брейкап полярных сияний, всплески АХ внезапно прекращаются. По-видимому, именно во время substorm growth phase в ионосфере создаются условия, способствующие прохождению ОНЧ волн к земной поверхности.

ОТКЛИК ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСОБЕННОСТИ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ, НАД КОТОРОЙ ПРОХОДЯТ ОРБИТЫ СПУТНИКОВ.

Ларкина В.И.

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

При пролете спутника над глубинными разломами литосферы в районе Баренцева и Карского морей были зарегистрированы всплески интенсивности магнитной и электрической составляющих поля низкочастотных излучений (в диапазоне 100 Гц – 20 кГц), одновременно зарегистрированные потоки мягких электронов ($E_e=50$ и 120 эВ) и температуры плазмы на высотах спутника.

Для анализа были выбраны орбиты спутника, близко пролежавшие над одной и той же областью. Результаты корреляционного анализа информации при пересечении траекторией спутника контрастных форм рельефа твердой земли позволили получить сведения о подобии (близости) форм всплесков компонент поля интенсивности излучений и других параметров ионосферной плазмы. Скорее всего, измеряемое волновое поле представляет смесь электромагнитной и электростатической волн. Корреляционный анализ показал, что параметры ионосферной плазмы по-разному реагируют на процессы в литосфере. Это и дало возможность проверить и подтвердить устойчивость во времени и в пространстве обнаруженного ранее эффекта, таким образом, в рассматриваемых данных обнаружено отчетливое соответствие тектонической структуры и вариаций параметров ионосферной плазмы.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОХОЖДЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА ОТ ОБЛАСТИ ГЕНЕРАЦИИ К ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Клейменова Н.Г., Никитенко А.С.

ПГИ, г. Анапты, Россия, olga.m.lebed@gmail.com

Одним из основных типов ОНЧ излучений в высоких широтах являются авроральные хиссы (шипения), наблюдающиеся на частотах выше 3-4 кГц в вечернее и ночное время. Эти излучения распространяются в магнитосфере и ионосфере в виде квазиэлектростатических свистовых волн с волновыми векторами, направленными к магнитному полю под близкими к 90° углами. К настоящему времени из спутниковых и наземных наблюдений собран значительный объем информации о структуре волн, их морфологических характеристиках и связи с геомагнитными возмущениями и полярными сияниями. Однако до сих пор остаются не до конца понятными механизмы распространения авроральных шипений от предполагаемой области их генерации к наземному наблюдателю.

Для интерпретации результатов наземных высокоширотных ОНЧ наблюдений нами была разработана численная модель распространения аврорального хисса от области генерации к земной поверхности. Модель включает в себя модули, описывающие статистические свойства квазиэлектростатических свистовых волн, генерируемых вследствие черенковского резонанса на высотах порядка 6-10 тыс. км, распространение волн в магнитосфере до области верхней ионосферы (ниже 5 тыс. км) с мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации, рассеяние ОНЧ волн на этих неоднородностях в конус прохождения и дальнейшее распространение волн через нижнюю ионосферу к земной поверхности. Результаты моделирования согласуются с результатами наблюдений.

СВИСТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ПЕРИОДЫ ВОЗМУЩЕНИЙ ИОНОСФЕРЫ

Михайлов Ю.М., Капустина О.В., Дружин Г.И.

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

ИКИР, Камчатка, Россия, drug@ikir.ru

Представлены результаты наблюдений активности свистов в обл. Карымшина (Камчатка) в период ноябрь-декабрь 2008г. Этот период характеризовался превышением значений foF2 и уменьшением hF2 по сравнению с обычным уровнем. Наиболее отчетливо этот эффект наблюдался в Иркутске, однако проявлялся и на Камчатке, хотя был выражен слабее. Такое событие объясняют [1] как изменением состава термосферы, так и возникновением западной составляющей электрического поля и градиента электронной концентрации в максимуме возмущений. Последнее также связывают с изменением направления северной компоненты межпланетного магнитного поля [1]. В обычных условиях показатель преломления ОНЧ-волн в дневных условиях выше, чем в ночных [2], а число свистов, напротив, ночью выше, чем днем. 18-19 декабря на Камчатке наблюдалось появление свистящих атмосфериков (СА) днем в таком же количестве, как и ночью, порядка 10 1/мин. В то же время в периоды, следующие за максимумом изменения характеристик ионосферы, 23, 24, 27, 29, 30 декабря наблюдалось резкое возрастание количества свистов в дневное время до ~50 1/мин. Возможно, что в данном случае источником свистов являются атмосферные разряды, инициируемые в тайфуне, который наблюдается вблизи сопряженной области в южном полушарии. Увеличение числа свистов связано с изменением условий захвата на силовой линии L=2,4.

1. Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Жеребцов Г.А, Пирог О.М., Полех Н.М. // Геомагнетизм и аэрономия, 2011, том 51, № 3, с. 360–367.
2. Strangeways H.S. // Journ. of Atm. and Terr. Phys. 1982. V.44.No.10. Pp.889-899.

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОНЧ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА ПО
ДАНЫМ НАЗЕМНОЙ РЕГИСТРАЦИИ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ.**

**А.С. Никитенко¹, О.М. Лебедь¹, Ю.В. Федоренко¹, Ю. Маннинен², Н.Г. Клейменова^{3,4},
С.В. Пильгаев¹, А.В. Ларченко¹.**

¹ Полярный геофизический институт (ПГИ РАН) г. Апатиты, Мурманская область, Россия,
alex.nikitenko91@gmail.com

² Геофизическая обсерватория Соданкюля, Финляндия

³ Институт Физики Земли (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

⁴ Институт Космических Исследований (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

Представлены результаты одновременной регистрации ОНЧ волн типа авроральный хисс в двух точках, расположенных в высоких широтах ($L \sim 5.5$) и разнесенных по долготе на ~ 400 км: финской станции Каннуслахто и российской обс. Ловозеро. Регистрирующая аппаратура в обсерватории Ловозеро позволяет измерять горизонтальные компоненты магнитного поля и вертикальную компоненту электрического поля ОНЧ волн. С ноября 2018 года на станции Каннуслахто, помимо горизонтальных компонент магнитного поля, ведется непрерывная регистрация вертикальной компоненты электрического поля. Была выполнена тщательная калибровка магнитных компонент установленных в Каннуслахто ОНЧ приемников, что дало возможность вычисления вектора Пойнтинга и определения азимутальных углов прихода волн с учетом их случайного характера.

Предложена модель распространения шумовых высокочастотных ОНЧ излучений в нижней ионосфере и волноводе Земля-ионосфера. С использованием результатов моделирования проведена оценка точности локализации области выхода ОНЧ волн из ионосферы. Показано, что форма распределения ориентации азимутальных углов определяется взаимным расположением ионосферной области выхода и наземной точки регистрации ОНЧ волн. Выполнен анализ нескольких выбранных событий.

**ПИТЧ-УГЛОВАЯ ДИФФУЗИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ ПРИ ИХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЭМИЦ ВОЛНАМИ: СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
РАСЧЕТОВ СО СПУТНИКОВЫМИ ДАННЫМИ**

Попова Т.А.¹, Демехов А.Г.^{1,2}, Любчик А.А.¹, Яхнин А.Г.¹

¹ ПГИ, г. Апатиты, Россия, tarkada@yandex.ru

² ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия.

По данным магнитосферных спутников проанализировано несколько случаев наблюдения ЭМИЦ волн в разных долготных секторах и на разных L-оболочках. Отбирались события, во время которых наблюдались высыпания энергичных протонов на низкоорбитальных спутниках POES, находящихся в сопряженных с положением магнитосферных спутников областях. С использованием частотного профиля интенсивности ЭМИЦ волн и данных о величине магнитосферного магнитного поля и плотности холодной плазмы были рассчитаны коэффициенты питч-угловой диффузии энергичных протонов на разных энергиях и питч-углах. Расчеты проводились в предположении, что холодная плазма содержит электроны, протоны, однократно ионизованные ионы гелия и кислорода. Результаты расчетов сопоставлялись с измеренными питч-угловыми распределениями потоков энергичных протонов в магнитосфере и с энергией и потоками высыпающихся протонов. В целом, вид измеренных питч-угловых распределений и энергия высыпающихся протонов согласуются с ожидаемыми на основании расчета коэффициентов питч-угловой диффузии.

ВЛИЯНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ НА УСИЛЕНИЕ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ИЗОЭНТРОПИЧЕСКИ НЕУСТОЙЧИВЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

Рящиков Д.С., Молевич Н.Е., Завершинский Д.И.

Самарский университет, СФ ФИАН, г. Самара, Россия, ryashchikovd@gmail.com

Крупномасштабные волновые возмущения в хромосфере и короне Солнца часто связывают с распространяющимися в среде магнитогидродинамическими (МГД) волнами. Характер распространения волн во многом определяется неадиабатическими процессами нагрева и радиационного охлаждения среды, которые приводят к возникновению дисперсии волн, а также их дополнительному затуханию или усилению (тепловая неустойчивость) [1]. Среда, в которой тепловыделение приводит к усилению бегущих мод, является изоэнтропически неустойчивой.

Усиление (магнито-) акустических волн подавляется как нелинейными, так и диссипативными процессами. В данной работе по отдельности рассматривается влияние диссипативных процессов вязкости, теплопроводности и электрической проводимости на усиление магнитоакустических волн в изоэнтропически неустойчивых тепловыделяющих средах. Распространение МГД-волн описывалось с помощью системы уравнений магнитной гидродинамики, дополненной источником тепловыделения, зависящим от температуры и плотности, для учета неадиабатических процессов нагрева и охлаждения. В работе получены аналитические выражения для инкрементов/декрементов магнитоакустических волн и условие их усиления. Так, в случае сильной диссипации вязкость и электрическая проводимость способны подавить усиление магнитоакустических волн во всем частотном диапазоне, а теплопроводность не влияет на усиление магнитоакустических волн в области низких частот. В случае же слабой диссипации подавляются только высокочастотные компоненты спектра. Также были рассчитаны граничные условия усиления магнитоакустических волн для типичных параметров солнечной короны с использованием функции радиационного охлаждения CHIANTI [2] и нескольких типичных сценариев нагрева солнечной короны. Показано, что усилению подвержены магнитоакустические волны с периодом более 1,5 минут.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта РФФИ 18-32-00344.

1. Field G.B. // The Astrophysical Journal 1965. V. **142**. P. 531-567.
2. Del Zanna G., Dere K.P., Young P.R., Landi E., Mason H.E. // A&A 2015. V. **582**. P. A56.

ОЦЕНКА ИНКРЕМЕНТА СВИСТОВЫХ ВОЛН В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ МАГНИТОСФЕРЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПОТОКОВ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА СПУТНИКЕ VAN ALLEN PROBE

Шкляр Д. Р., Титова Е. Е.

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

Как показано в ряде работ, резонансное взаимодействие свистовых волн и энергичных электронов наиболее эффективно в приэкваториальной области магнитосферы. На спутниках VanAllenProbes, наряду с волновыми измерениями, проводятся измерения потоков энергичных частиц. Хотя эти измерения не выполняются непосредственно на экваторе, они дают возможность с определенной степенью точности восстановить функцию распределения энергичных частиц на экваторе и рассчитать инкременты волн в этой области. В настоящем докладе представлены результаты таких расчетов. Мы использовали измерения потоков энергичных электронов в диапазоне энергий от 5.217 до 51.768 кэВ для пяти значений локального питч-угла (исключая измерения вблизи конуса потерь, где измерения оказываются недостоверными), выполненные прибором HORE на спутнике VanAllenProbe.

Функция распределения электронов в системе СГС как функция энергии и питч-угла связана с дифференциальным потоком J , выраженным в практических единицах, соотношением

$$F(W, \alpha) = 1.67 \cdot 10^{-37} J/W,$$

где W – энергия частиц в кэВ и J – дифференциальный поток в единицах $1/(\text{кэВ} \cdot \text{с} \cdot \text{стер})$. Пример усредненной по десятиминутному интервалу времени функции распределения в переменных (W, α) показан на Рис. 1. В настоящем докладе исследована эволюция функции распределения во времени, связанная с прохождением по силовой трубке, вблизи которой производится измерение потоков частиц, мощного свиста, а также соответствующих инкрементов свистовых волн в диапазоне частот от 1 до 10 кГц.

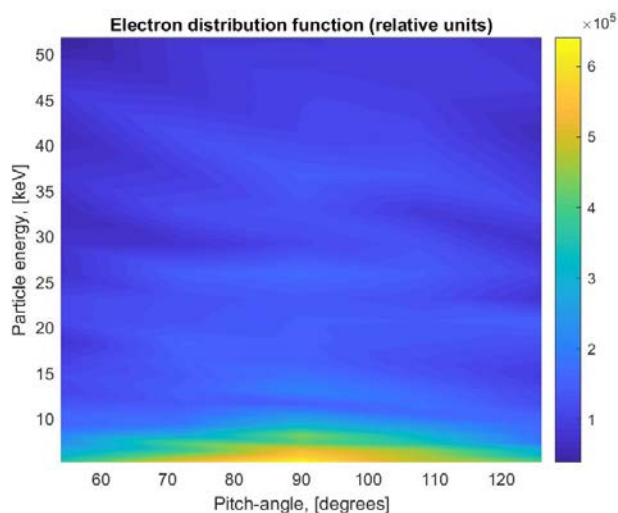


Рис. 1. Усредненная по времени функция распределения электронов как функция энергии и питч-угла по данным измерений потоков частиц 22.12.2014 в интервале времени 19:23 – 19:26, выполненных на спутнике VanAllenProbe-B.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №19-02-00179_а.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛОТРОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВО ВРЕМЯ ПОДЖАТИЙ МАГНИТОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ VAN ALLEN PROBES

Е.Е. Титова, А.Г. Демехов, А.А. Любчик, Ю. Маннинен, А.Г. Яхнин, Т.А. Яхнина
ПГИ, г. Апатиты, Россия, lena.titova@gmail.com

Амплитудные и спектральные характеристики ОНЧ/КНЧ волн проанализированы по результатам измерений на спутниках Van Allen Probes (VAP-A и VAP-B) и на Земле во время поджатий магнитосферы. Спутники Van Allen Probes позволяют анализировать циклотронное взаимодействие свистовых волн с электронами радиационных поясов, поскольку их орбита лежит преимущественно в экваториальной области внутренней магнитосферы, и они оснащены специализированным комплексом аппаратуры, предназначенным для измерения параметров холодной и горячей плазмы, включая питч-угловые распределения электронов в широком диапазоне энергий 10^2 - 10^3 кэВ. На спутниках Van Allen Probes также проводятся многокомпонентные измерения волновых полей в низкочастотном диапазоне 10 Гц - 20 кГц. Одновременные наблюдения ОНЧ излучений на Земле, позволяющие разделять пространственные и временные вариации сигналов, регистрируемых на ИСЗ, проводились в северной Финляндии на станции Каннуслахто ($L=5.3$).

В докладе рассмотрены два события 14.09.2017 и 08.01.2018, во время которых на спутниках VAP-A и VAP-B, находящихся в утреннем и дневном секторах (09-15 MLT) вблизи экватора в области $L \approx 4$ -6, регистрировались существенные (до 10%) увеличения магнитного поля, связанные с поджатиями магнитосферы. Интенсификации свистовых волн, коррелировавшие с вариациями магнитного поля, наблюдались в ОНЧ диапазоне на частотах 2-6 кГц, вблизи половины гирочастоты электронов. В событии 14.09.2017 наблюдались также волны в КНЧ диапазоне (10^2 - 10^3 Гц). Анализ многокомпонентных волновых измерений показал, что обусловленные поджатием ОНЧ/КНЧ излучения распространялись от экватора с малыми углами волновых нормалей по отношению к магнитному полю, что согласуется с их генерацией за счет развития циклотронной неустойчивости.

По данным о функции распределения энергичных электронов и параметрам холодной плазмы вдоль траекторий спутников были рассчитаны частотно-временные зависимости инкрементов циклотронной неустойчивости свистовых волн, а по данным о спектре волн — коэффициенты диффузии энергичных электронов (предполагалось продольное распространение волн). Показано, что коэффициенты диффузии свистовых волн в обоих событиях имели максимумы на энергиях около 0.1-1 кэВ, обусловленные ОНЧ волнами на частотах 2-6 кГц, и в событии 14.09.2017 дополнительный максимум на энергиях 10-100 кэВ, обусловленный КНЧ волнами с частотами 10^2 - 10^3 Гц. Одновременно с КНЧ волнами низкоорбитальные спутники POES на $L = 4.5$ -6.5 и в интервале 11-15 MLT регистрировали высыпания электронов с энергиями 30-300 кэВ, которые, вероятно, были обусловлены их взаимодействием с КНЧ волнами, наблюдававшимися на спутниках VAP.

ГЕНЕРАЦИЯ КРУТИЛЬНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ И МЕДЛЕННЫХ МАГНИТОЗВУКОВЫХ ВОЛН ПЕРИОДИЧЕСКИМИ СГУСТКАМИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ЗАМАГНИЧЕННОМ ФОНЕ

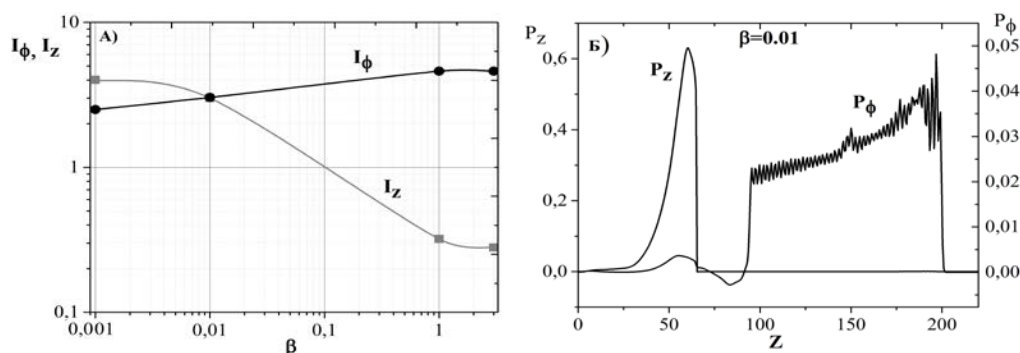
Березуцкий А.Г., Тищенко В.Н., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, a.berezuckiy@yandex.ru

С использованием численного моделирования, в настоящей работе исследуется влияние параметров замагниченной фоновой плазмы на интенсивность квазистационарных альфвеновских (АВ) и медленных магнитозвуковых (МВ) волн, создаваемых периодическими сгустками лазерной плазмы в силовой трубке магнитного поля.

Для реализации результатов, в расчетах использовалась трехжидкостная МГД модель [1] с осевой симметрией относительно внешнего магнитного поля. Сферическая геометрия разлета сгустка позволяла генерировать с высокой эффективностью АВ и МВ, которые распространялись вдоль оси магнитной силовой трубки. Установлено, что длина КВ пропорциональна количеству сгустков, а ее радиус зависит от энергии одного сгустка $R_d = (Q/p_o)^{1/3}$ и суммарного давления замагниченной плазмы фона $p_o = B^2/8\pi + nT$.

Результаты расчетов показали, что в области $\beta > 1$ АВ и МВ имеют близкие значения скоростей, волны совмещены в пространстве и формируют единый поток вращающейся плазмы, который, переносит в основном азимутальный импульс I_ϕ . В сильных магнитных полях $\beta \ll 0.1$, как следует из расчетов, давление на переднем фронте МВ много больше давления плазмы фона, что обуславливает сверхзвуковое распространение МВ. Так в диапазоне $\beta = 10^{-2} \div 10^{-3}$ расчетное значение скорости МВ в $\sim 3 \div 5$ раз меньше скорости АВ.



А) Продольный импульс (I_z) МВ и азимутальный импульс (I_ϕ) АВ в зависимости от величины β ; Б) Распределение вдоль магнитной силовой трубки интенсивности продольного импульса (P_z) МВ и азимутального импульса (P_ϕ) АВ для момента времени $t=200$. $\beta=0.01$.

Работа выполнена в рамках программы РАН № 56., при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-32-00029, № 18-42-543019.

1. В.Н. Тищенко, И.Ф. Шайхисламов, А.Г. Березуцкий. Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности: Альманах /Под редакцией ак. В.А. Садовниченко, ак. Г.И. Савина, чл.-корр. Вл.В. Воеводина. М.: Издательство МГУ, 2014, с. 65.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВОЗБУЖДЕНИЯ МОНОХРОМАТИЧНЫХ РС4 ПУЛЬСАЦИЙ ОБЛАКОМ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА ERG

В.Б. Белаховский¹, К. Шиокава², Е. Миоши²

¹ – *Полярный геофизический институт, г. Апатиты*

² – *Институт исследования околоземного космического пространства, г. Нагоя, Япония*

В работе исследована физическая природа монохроматичных геомагнитных пульсаций Pc4 диапазона с использованием данных японского спутника ERG (Exploration of energization and Radiation in Geospace). Данный тип пульсаций генерируется при очень спокойных геомагнитных условиях, при этом пульсации не видны на наземных магнитометрах. Для события 4 мая 2017 года по данным спутника ERG волновой пакет Pc4 пульсаций был зарегистрирован в послеполуночном секторе MLT в интервале 08-10 UT. Пульсации наиболее выражены в радиальной, азимутальной компонентах магнитного поля, их частота составляла около 13 мГц. На геостационарном спутнике GOES-13, располагающемся на более высокой L-оболочке, чем спутник GOES-13, частота этих пульсаций составляла около 11.5 мГц. Уменьшение частоты геомагнитных пульсаций с увеличением L-оболочки говорит об их резонансной природе. В момент появления пакета пульсаций на спутнике ERG обнаружена инжекция электронов, наиболее выраженная в энергетических каналах 10-80 кэВ. Эта инжекция совпала с небольшим скачком AE индекса до примерно 200 нТл, то есть, по всей видимости, инжекция была вызвана очень небольшой суббурей. Мы полагаем, что инжектируемое в утренний сектор облако электронов является причиной возбуждения монохроматичных геомагнитных Pc4 пульсаций.

ДИНАМИКА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СПЕКТРОВ УНЧ ШУМОВЫХ ПОЛЕЙ В ПЕРИОДЫ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НА РАЗНЫХ ШИРОТАХ.

Е.Н. Ермакова, А.В. Першин, А.В. Рябов, Д.С. Котик.

НИРФИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Н. Новгород, Россия, l.ermakova@nirfi.unn.ru

На основе анализа данных многолетнего мониторинга, охватывающего период с 2003 по 2015 г.г., на среднеширотном низкочастотном пункте (46^0 в.д. 56^0 с.ш) исследованы особенности динамики спектров поляризации во время магнитных бурь разной интенсивности. Анализировалась глубина вариаций поляризационного параметра (ϵ_{ps}) в спектрах фонового УНЧ шума (0.5-20 Гц), связанных с влиянием резонатора суб-ИАР (ионосферный резонатор на высотах 80 –300 [1]). Обнаружено, что в периоды начальной и главной фазы сильных магнитных бурь с Кр-индексом > 6 наблюдалось полное исчезновение характерной зависимости (ϵ_{ps}) с изменением знака с отрицательного на положительный. Как правило, одновременно наблюдалось исчезновение резонансной структуры спектра (РСС), вызванной влиянием резонатора ИАР. Это свидетельствует о резком уменьшении коэффициента отражения н/ч волн как от верхнего, так и от нижнего основания F -слоя ионосферы в связи с сильным уменьшением электронной концентрации N_e в его максимуме. Но в некоторых случаях при высокой оптической толщине ионосферных слоев резонатора суб-ИАР ($f_{gr} \leq 2$ Гц, f_{gr} – частота, отделяющая положительные значения от отрицательных в спектре ϵ_{ps}) наблюдалось исчезновение только РСС. Дополнительными факторами, влияющими на динамику спектров поляризации в периоды повышенной геомагнитной активности является изменение профилей N_e на высотах E -слоя и долины-ионосферной области, расположенной между E и F - слоями. В фазе восстановления после сильных магнитных бурь при незначительном увеличении Кр – индекса, регистрировалось также полное исчезновение влияния резонатора суб-ИАР. Это наблюдалось одновременно с регистрацией высокочастотных $Pc1$ на станции, и, по-видимому, связано с дополнительной ионизацией E -слоя ионосферы на средних широтах высыпаящимися энергичными частицами. Увеличением концентрации N_e на высотах E - слоя и долины, возникновением E_s -слоев и увеличением высоты максимума F -слоя в фазе восстановления можно объяснить также часто наблюдаемые малые значения f_{gr} в спектрах ϵ_{ps} . Выполнены модельные расчеты поляризационного параметра на основе модели IRI-2017. На основе сравнения расчетных спектров с экспериментальными и с данными ионозонда, расположенного на удалении 29 км от приемного пункта, выполнена корректировка профилей N_e на высотах 80-300 км. В результате были получены расчётные спектры ϵ_{ps} , близкие к экспериментальным и определены изменения N_e , приводящие к наблюдаемой динамике спектров (ϵ_{ps}). Также выполнен анализ особенностей спектров поляризации УНЧ шума в периоды повышенной геомагнитной активности на более низких широтах ($\sim 35^0$ с.ш.). Обнаружено, что исчезновение проявления резонатора суб-ИАР наблюдается при - индексе ≥ 8 , а геомагнитная активность с Кр-индексом $\sim 6-7$ приводит к уменьшению f_{gr} в спектрах ϵ_{ps} . Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты №№, 18-42-520035, 18-05-00108.

1. E. N. Ermakova, D. S. Kotik, A. V. Pershin, V. A. Pilipenko, and K. Shiokawa. // Radiophysics and Quantum Electronics 2017, V. **59**, No. **12**, DOI 10.1007/s11141-017-9764-4, P. 947.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ХОРОВЫХ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ

Ларченко А.В., Демехов А.Г., Козелов Б.В.

ПГИ, г. Апатиты, Россия, alexey.larchenko@gmail.com

В работе предложены два различных подхода к детектированию дискретных элементов хоровых ОНЧ излучений на основе обработки динамических спектрограмм, построенных по данным регистрации компонент электромагнитного поля. Построение динамических спектрограмм, оптимальных для целей детектирования дискретных элементов хоров, предлагается производить с помощью локального преобразования Фурье. Даны общие рекомендации по выбору их параметров и предварительной обработке для выделения на них мелкомасштабных по времени элементов хоров.

Первый метод детектирования дискретных элементов хоров основан на применении алгоритмов поиска границ к предварительно обработанному изображению динамического спектра. Второй основан на применении к данному изображению разработанного авторами алгоритма сканирования, предназначенного для поиска и извлечения параметров дискретных элементов. В основе алгоритма сканирования лежит выделение на изображении элементов, соответствующих заданному параметризованному набору шаблонов, методами математической морфологии.

Тестирование разработанных методов произведено для нескольких случаев наблюдений хоровых излучений на спутниках Van Allen Probes. Показано, что при оптимальном выборе параметров оба метода при наблюдении интенсивных дискретных хоров дают суммарный процент ошибок, связанных с пропуском цели и ложным срабатыванием, примерно 10% от числа элементов, видимых человеческим глазом. Результаты применения данных методов могут быть использованы как по отдельности, так и совместно, т.е. поиск множества точек, соответствующего параметризованному шаблону, может быть выполнен внутри выделенного алгоритмом поиска границ сегмента изображения.

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИСКУССТВЕННОГО
ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ
НА СТЕНДЕ «СУРА» В ПЕРИОД С 2010 ПО 2016 гг.**

Дементьев В. О.¹, Когогин Д. А.¹, Насыров И. А.¹, Шиндин А. В.², Грач С. М.²,
Акчурин А. Д.¹

¹ КФУ, г. Казань, Россия, denis.kogogin@gmail.com

² ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия

В работе выполнена оценка статистической связи интенсивности искусственного оптического свечения в красной линии оптического свечения ($\lambda=630$ нм) стимулированного мощным радиоизлучением стенда «Сура» со следующими показателями: толщиной резонансного слоя Δh ; высотой отражения волны накачки h_r ; разности критической частоты ионосферы f_oF2 и частоты волны накачки f_o . Эксперименты были проведены в период с 2010 по 2016 гг. на стенде «Сура» ($56^{\circ}09'$ с. ш., $46^{\circ}06'$ в. д.). Удачными с точки зрения регистрации искусственного оптического свечения были 6 экспериментальных дней: 15.03.2010; 17.03.2010; 12.03.2013; 24.08.2014; 26.08.2014; 29.08.2016. Для воздействия на ионосферу во всех сеансах использовалась волна обыкновенной поляризации. ДН стенда «Сура» ориентировалась либо в зенит, либо была направлена на 12° к югу в плоскости геомагнитного меридиана.

Для анализа использовались следующие исходные данные: интенсивность оптического свечения в Релеях, разность критической частоты ионосферы и частоты волны накачки, толщина резонансного слоя и высота отражения волны накачки, рассчитанная методом расчёта лучевых траекторий. Таким образом, каждому циклу излучения волны накачки соответствовали 4 показателя. Общее количество исследуемых циклов составило более 60.

Далее, были рассчитаны уравнения линейной и нелинейной регрессии, проведена оценка значимости полученных уравнений и построены двумерные гистограммы распределения интенсивности оптического свечения с тремя показателями (f_oF2-f_o , Δh , Rh) отдельно для данных, полученных с использованием ионозондов Cadi и Циклон. Аппроксимация с использованием параболического уравнения регрессии для исходных данных оказалась статистически значимой с вероятностью 0,95.

Согласно результатам, полученным с использованием ионозонда Cadi (ионограммы имеются за каждый экспериментальный день), наиболее часто оптическое свечение возникало в диапазоне f_oF2-f_o от 0 до 1 МГц (от 0 до 20 Рл — 20 раз; от 20 до 40 Рл — 20 раз; от 40 до 60 Рл — 10 раз), в диапазоне средней толщины резонансного слоя от 0 до 5 км (от 0 до 20 Рл — 17 раз; от 20 до 40 Рл — 15 раз; от 40 до 60 Рл — 3 раза), и в диапазоне средней высоты отражения от 240 до 270 км (от 0 до 20 Рл — 17 раз; от 20 до 40 Рл — 9 раз; от 40 до 60 Рл — 7 раз). Результаты, полученные с использованием ионозонда Циклон (ионограммы имеются для следующих дней: 12.03.2013; 24.08.2014; 26.08.2014), наиболее часто оптическое свечение возникало в диапазоне f_oF2-f_o от 1 до 2 МГц (от 0 до 20 Рл — 15 раз; от 20 до 40 Рл — 1 раз; от 40 до 60 Рл — 2 раза), в диапазоне средней толщины резонансного слоя от 5 до 10 км (от 0 до 20 Рл — 18 раз; от 20 до 40 Рл — 10 раз; от 40 до 60 Рл — 2 раза), и в диапазоне средней высоты отражения от 240 до 270 км (от 0 до 20 Рл — 15 раз; от 20 до 40 Рл — 4 раза; от 40 до 60 Рл — 2 раза).

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (№ 17-72-10181).

СТОЯЧИЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ГЕЛИОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Высикайло Ф.И., Некрасов Г.Ю., Пронин Н.А.
МГОУ г. Москва, Россия, filvys@yandex.ru

Установлены и верифицированы основные причины возникновения плазменных слоев объемного заряда (стоящих ударных волн электрического поля) на расстояниях 10-30 радиусов Солнца от положительно заряженного Солнца и на расстоянии ~ 37 км от поверхности Земли. (Ударная волна электрического поля – аналог эффекта Гана в полупроводниках). Исследованы аналитически: 1) глобальная электрическая цепь гелиосферы (ГЭЦГ); 2) структуры стоячих ударных волн электрического поля в зависимости от заряда Солнца и, соответственно, от заряда Земли; 3) скорости постоянных компонент солнечного ветра (СВ), состоящего из протонов, альфа-частиц и других положительных ионов, летящих от Солнца; 4) неоднородная плазма гелиосферы положительно заряженного Солнца, мезосферы и ионосферы отрицательно заряженной Земли и 4) бесконтактный нагрев электронов в электрическом поле заряженных астрофизических объектов таких как звезды и планеты. Доказывается, что основная причина этих явлений, – положительный заряд Солнца (звезд) и отрицательный заряд Земли (планет). Возникновение постоянного СВ обусловлено возникновением для протонов, альфа-частиц и других положительных ионов кулоновских зеркал, отражающих и ускоряющих их кулоновскими силами от Солнца. Во многом это явление аналогично явлениям формирования потока ионов в области анодного падения потенциала в обычных газовых разрядах. В этом решение асимптотического парадокса – обратного движения СВ от Солнца, а не к Солнцу. Этот парадокс аналогичен парадоксу Штарка. В 1903 г. он экспериментально установил обратное движение катодного пятна в поперечном (току) магнитном поле. В результате нашего исследования СВ отнесен к классу электрического (ионного или плазменного) ветра, наблюдавшегося в лабораториях Франклина и его последователей (франклиново колесо) на острых металлических иглах при больших напряженностях электрических полей – E . Впервые исследуется синергетика (со-организация, совместное действие) конвективных дуальных (кумулятивных и диссипативных) потоков в области заряженных структуру Космоса: звезд и планет, в частности исследуются общие причины возникновения солнечного ветра и ионосферы Земли. Косвенным признаком кумулятивных процессов в КД структурах типа Солнца и Солнечной системы может являться не только вращение (об этом утверждал Е.И. Забабахин), но и нарушение нейтральности и формирование противоположно направленных – бициклонических вращающихся потоков кумулирующей всей массы Солнца к его центру и расфокусирующей массы солнечного ветра, покидающего солнечную систему, см. подробнее [1]. Зная ионный состав солнечного ветра, согласно предложенной в данной работе методике, мы можем рассчитать электрические параметры самого Солнца, его короны и оценить энергетические параметры солнечного ветра в области Земли. По известному заряду Земли построены профили температуры электронов в нижней ионосфере Земли. Доказано, что в нижней ионосфере идут процессы ионизации в поле отрицательно заряженной Земли. Анализируются возможные функциональные свойства положительно заряженного джета из центра галактики М 87.

1. Высикайло Ф.И. Архитектура кумуляции в диссипативных структурах. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing. 2013, - 352 с.

СОПРЯЖЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ QP ЭМИССИЙ НА СПУТНИКЕ ERG И НА СТАНЦИИ ЛОВОЗЕРО

В.Б. Белаховский¹, К. Шиокава², Е. Миоши²

¹ – *Полярный геофизический институт, г. Апатиты*

² – *Институт исследования околоземного космического пространства, г. Нагоя, Япония*

В работе исследованы одновременные QP эмиссии, регистрируемые на японском спутнике ERG (Exploration of energization and Radiation in Geospace) и на станции Ловозеро (Кольский полуостров) Полярного геофизического института. Отбирались те моменты, когда спутник ERG и станция Ловозеро были геомагнитно сопряжены. Более детально исследован один из случаев в вечернем секторе MLT, когда одновременные QP эмиссии на Земле и на спутнике ERG наблюдались в течение примерно 70 минут на восстановительной фазе слабой геомагнитной бури. При этом наблюдалась очень высокая корреляция между QP элементами на Земле и на спутнике ERG. QP эмиссии регистрировались в частотном диапазоне примерно 1-2 кГц, период самих QP эмиссий составлял около 40 секунд. Внутри QP эмиссий наблюдается более высокочастотная тонкая структура, физическая природа которой не совсем ясна. Интересно, что по данным спутника ERG QP эмиссии видны только в электрическом поле, в магнитном поле QP эмиссии не видны. В ходе анализа обнаружено, что QP эмиссии не сопровождаются одновременными геомагнитными пульсациями с тем же периодом по данным наземных магнитометров. При этом по данным магнитометра на спутнике ERG с помощью спектрального анализа удалось идентифицировать частоту, очень близкую к частоте QP эмиссий. Возможно, появление данных QP эмиссий связано с мелкомасштабными геомагнитными Pc3 пульсациями, которые регистрируются в космосе и не видны на наземных магнитометрах вследствие их затухания в ионосфере. Поэтому рассматриваемые QP эмиссии следует отнести к QP1 классу.

**РАССЕЯНИЕ КВАЗИЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН
НА БЕСКОНЕЧНО ДЛИННОМ ПРОВОДЯЩЕМ ЦИЛИНДРЕ
В ХОЛОДНОЙ МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ**

Широков Е.А.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, evshirok@gmail.com

В работе проанализировано рассеяние квазиэлектростатических волн, распространяющихся в направлении образующих резонансного конуса, на бесконечно длинном проводящем цилиндре, ориентированном вдоль внешнего магнитного поля, в холодной плазме. Получены аналитические выражения для поля и сечения рассеяния в случае падения плоской монохроматической волны. Примечательно, что эти соотношения совпадают с соответствующими выражениями для случая наклонного падения электромагнитной волны на цилиндр в изотропной среде без дисперсии. Кроме того, задача о рассеянии пакета квазиэлектростатических волн (с непрерывным и достаточно широким спектром волновых чисел, полагавшимся заданным) была решена численно, с использованием быстрого преобразования Фурье.

Полученные результаты могут быть использованы для интерпретации спутниковых данных по волновым измерениям полей хоровых излучений в радиационных поясах (например, с помощью космических аппаратов THEMIS и Van Allen Probes).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 17-72-10106).

ОДНОВРЕМЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЭМИЦ И ОНЧ/КНЧ ВОЛН И ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ ВО ВРЕМЯ МНОЖЕСТВЕННЫХ ПОДЖАТИЙ МАГНИТОСФЕРЫ

Яхнин А.Г.¹, Ю. Маннинен², Т. Райта², Т.А. Яхнина¹, Е.Е. Титова¹, А.Г. Демехов^{1,3},
Попова Т.А.¹

¹Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия, ayahnin@gmail.com

²Геофизическая обсерватория Соданкюля, Финляндия

³Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

Серия всплесков ЭМИЦ и ОНЧ/КНЧ волн с длительностью и интервалом повторения порядка нескольких минут была зарегистрирована спутниками Van Allen Probes (VAP-A и VAP-B) во время множественных поджатий магнитосферы в интервале 11-15 UT 14 сентября 2017 г., когда спутники находились вблизи апогея ($L=5-6 R_E$) на дневной стороне магнитосферы. Поджатия магнитосферы проявляются в импульсных усилениях магнитного поля, измеряемого на спутниках и на наземных станциях. Подобная временная структура видна и в геомагнитных пульсациях Pc1 по данным сети индукционных магнитометров и в ОНЧ/КНЧ излучениях по данным приемника ОНЧ волн на станции Каннуслехто. Сопоставление волновых измерений на спутниках VAP с данными низкоорбитальных спутников POES о высыпаниях протонов и электронов, а также расчеты коэффициентов диффузии при циклотронном взаимодействии позволили идентифицировать высыпания частиц, связанные с разными типами волн. Это высыпания энергичных ($E > 30$ кэВ) протонов и электронов в широком (несколько часов) диапазоне MLT на $L > 4$. Сделан вывод, что эти высыпания являются следствием развития ионно- и электронно-циклотронной неустойчивостей, стимулированного увеличением поперечной анизотропии частиц кольцевого тока и радиационного пояса во время импульсных поджатий магнитосферы.

**ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
И АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ЯВЛЕНИЙ
НА СУБПЕТАВАТТНОМ ЛАЗЕРНОМ СТЕНДЕ PEARL**

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

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

Взаимодействие высокоскоростных потоков плотной плазмы с магнитными препятствиями является одной из фундаментальных задач физики космической плазмы, связанной, например, с процессами формирования планетарных и звездных магнитосфер. Активные космические и лабораторные эксперименты продемонстрировали определяющую роль мелкомасштабной неустойчивости, развивающейся в области взаимодействия плазменного потока с магнитным полем и связанной с эффектами конечного ларморовского радиуса ионов. Развитие подобной неустойчивости определяет структуру плазменного потока и динамику его проникновения в область, занятую магнитным полем.

В докладе представлены экспериментальные результаты, полученные на лазерно-плазменном стенде PEARL (ИПФ РАН) в рамках относительно нового подхода к задаче лабораторного моделирования процессов взаимодействия плазменных потоков с магнитным полем [1]. Так, на стенде PEARL эксперименты проводятся в очень сильном магнитном поле (напряженностью порядка 10-20 Тл), что позволяет уменьшить характерные размеры области торможения высокоскоростного потока плазмы, влетающего с характерными скоростями порядка 300-1000 км/с поперек внешнего магнитного поля, до нескольких миллиметров. Более того, характерные концентрации лазерной плазмы в получающемся облаке оказываются больше или порядка 10^{17} см^{-3} , что позволяет использовать широкий спектр лазерных методов диагностики параметров плазмы (интерферометрия, поляриметрия, шадоуграфия и пр.), обладающих исключительно высоким пространственным и временным разрешением. Вкупе с хорошей повторяемостью параметров лазерной плазмы это обеспечивает возможность детального изучения динамики взаимодействия облака лазерной плазмы с магнитным полем. Более того, при использовании подобного подхода появляется возможность варьировать геометрию плазменного потока, что практически невозможно в лабораторных экспериментах на крупномасштабных установках [2,3]: так, например, поперечный размер плазменного потока может быть выбран практически любым, в том числе и значительно превышающим длину торможения плазменного потока магнитным полем, что позволяет провести эксперименты, например, по разлету «плоского» плазменного облака.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-02-00850 и Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы" (Уникальный идентификатор проекта RFMEFI60717X0196).

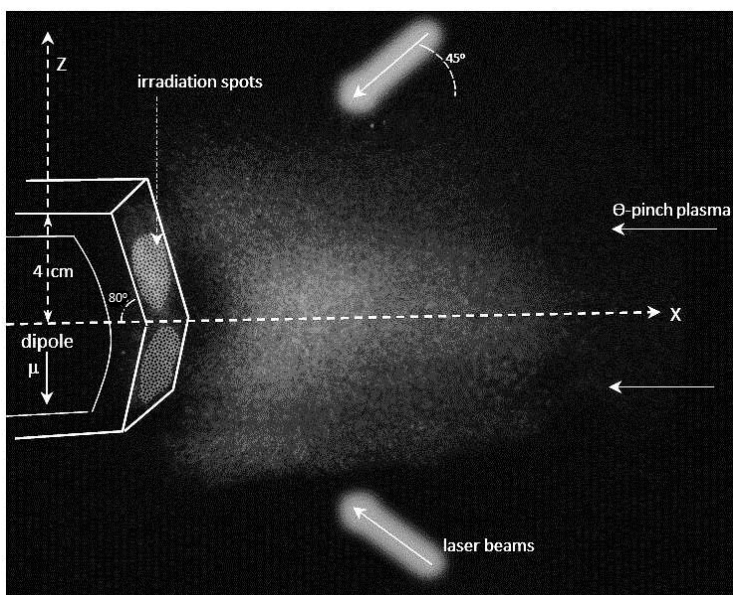
1. Курбатов Е.П. и др., *Астрономический журнал*, 95, 509 (2018).
2. Захаров Ю.П. и др., *Физика плазмы*, 32, 207 (2006).
3. Bondarenko et al., *Phys. Plasmas*, 24, 082110 (2017).

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИ-МАГНИТОСФЕРНЫХ ВЫБРОСОВ ПЛАЗМЫ

Шайхисламов И.Ф., Посух В.Г., Захаров Ю.П., Бояринцев Э.Л.

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

В лабораторном эксперименте с применением лазерной плазмы исследуется быстропротекающее взаимодействие взаимопроникающих плазменных потоков в дипольном магнитном поле. Первый квазистационарный поток создается тета-пинчем и формирует магнитосферу вокруг магнитного диполя. Два луча лазерного излучения фокусируются на поверхность двух мишеней, симметрично расположенных на корпусе диполя и создают поток лазерной плазмы, расширяющейся наружу от диполя и навстречу плазме тета-пинча. Лазерная плазма имеет достаточную энергию для прорыва через дипольное магнитное поле и разлета сквозь фоновую среду на большие расстояния. Зондовые измерения далеко за пределами первоначальной магнитосферы показали, что лазерная плазма приносит с собой магнитное поле на порядок большее по величине, чем вакуумное дипольное поле на рассматриваемых расстояниях. В отличие от предыдущих экспериментов и теоретических моделей расширения лазерной плазмы в однородном замагниченном фоне [1], в настоящих опытах не наблюдалось



сжатие магнитного поля на фронте лазерной плазмы. На основе полученных данных сделан вывод, что лазерная плазма в процессе расширения внутри магнитосферы захватывает замагниченную оболочку, сформированную фоновой плазмой [2], и переносит ее на большие расстояния за пределы исходной магнитосферы [3]. Мотивация подобных опытов состоит в моделировании экстремально мощных взрывных выбросов плазмы в геомагнитном поле Земли, порождающие глобальные возмущения магнитосферы. Новое применение

состоит в моделировании истечения атмосферной плазмы горячих экзопланет в присутствии слабого дипольного поля и звездного плазменного ветра [4, 5].

Рисунок 1. Схема эксперимента и типичная фотография лазерной плазмы с короткой экспозицией.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0307-2017-0015, при частичной поддержке РФФИ грант 18-12-00080.

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

**ЛАБОРАТОРНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ
ВЗРЫВНОЙ ГЕНЕРАЦИИ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН (БУВ) В
ЗАМАГНИЧЕННОМ ФОНЕ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МАГНИТНОГО
ЛАМИНАРНОГО МЕХАНИЗМА (МЛМ)**

**Захаров¹ Ю.П., Терехин² В.А., Пономаренко¹ А.Г., Шайхисламов¹ И.Ф., Посух¹ В.Г.,
Антонов¹ В.М., Бояринцев¹ Э.Л., Березуцкий¹ А.Г., Вшивков¹ К.В., Мирошниченко¹ И.Б.,
Дудникова³ Г.И., Вшивков⁴ В.А.**

¹ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ki1z@mail.ru

²ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

³ИБТ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

⁴ИБММГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Лабораторное моделирование БУВ, в экспериментах с поршнем Лазерной Плазмы (ЛП) в замагниченной Фоновой Плазме (ФП), является до сих пор актуальной и практически важной задачей, даже на современном уровне возможностей Лабораторной Астрофизики (с МДж-лазерами). На крупномасштабной установке КИ-1 ИЛФ ($\varnothing 1,2\text{ м} \times 5\text{ м}$ с кДж-лазером) эта задача решалась с начала 80-90^х годов на основе физической модели и РИС-расчетов ВНИИЭФ [1] по бесстолкновительному МЛМ-взаимодействию сферического облака ЛП с ФП, впервые подтвержденных в эксперименте «Облако» [2]. В завершение этого 1 этапа опытов с квази-сферическими облаками (с энергией до $E_k \approx 50$ Дж) на КИ-1 и впервые зарегистрированной генерацией ими [3] сильных вистлерных возмущений (вдоль поля $\mathbf{B}_0$), именно на примере вистлеров была оттестирована собственная программа «Облако» [3], для РИС-расчетов сферических облаков в фоне по гибридной модели при числах Альфвена $M_A \geq 1$.

В результате последующих исследований различных режимов генерации сгустков ЛП с плоских СН-мишеней, была установлена уникальная возможность таких сгустков (с большим углом разлета ≥ 1 ср и кинетической энергией $E_k \sim 50$ Дж), так же эффективно вытеснять магнитные поля (в т.ч. дипольное [5]), как и сферические ЛП, с энергией $E_0 \sim 200\text{--}400$ Дж. Для таких сгустков ЛП было введено понятие их данной величины эффективной энергии E_{0e} и именно на их основе была рассмотрена возможность [4] генерации БУВ на КИ-1 за счет смещения мишени к стенке камеры и использования полного размера столба фона $\varnothing 80$ см, при требуемом в МЛМ большом размере каверны ЛП до $R \approx 0,5\text{ м} \geq$ Лармора ионов.

Данные условия впервые были выполнены в ходе эксперимента «БУВ» ИЛФ [6] по генерации в H^+ -фоне поперечной БУВ (с 2-кратным скачком n и B на фронте), а затем – квази-перпендикулярной БУВ [7] с типичным вистлерным предвестником (с длиной волны $\sim C/W_{pi}$) перед фронтом n . В завершение обсуждаются результаты наиболее сложного текущего эксперимента **МЕГ-БУВ** с поперечной БУВ в He^+ -фоне и спектроскопической диагностикой в сравнении с последними данными на крупнейшей плазменной установке **LAPD** [8] в США.

Работа была выполнена в рамках Программы № **0307-2017-0015** Фундаментальных исследований ИЛФ СО РАН и при частичной поддержке Проекта N22 Программы N17 «Экстремальное лазерное излучение» Президиума РАН.

1. Башурин В.П., Голубев А.И., Терехин В.А. // ПМТФ 1983. №5. С. 10.
2. Антонов В.М., Башурин В.П., Захаров Ю.П. и др. // ПМТФ 1985. №6. С.3.
3. Dudnikova G.I., Ponomarenko A.G., Vshivkov V.A., Zakharov Yu.P. et al, // Proc. Joint ESA Workshop «Plasma Astrophysics»: ESA SP-311 1990. P. 191.
4. Zakharov Yu.P. // IEEE Transactions on Plasma Science 2003. V. **31**. P. 1243.
5. Zakharov Yu.P., Vshivkov K.V., Horton W. et al., // Astrophys. Space Sci. 2009. V. **322**. P. 151.
6. Захаров Ю.П., Пономаренко А.Г., Терехин В.А. и др. // Квант. Электр. 2016. Т. **46**. С. 399.
7. Zakharov Yu.P., Ponomarenko A.G., Terexhin V.A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. **927**. #012078
8. Bondarenko A.S., Schaeffer D.B., Everson E.T. et al., // Phys. Plasmas 2017. V. **24**. #082110.

**КЛИМАТ ЗЕМЛИ В 17-24 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ
(1933-2017 ГГ.)**

Л.З. Бикташ

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова
РАН, г.Москва, г. Троицк, Россия; lilia_biktash@mail.ru*

В последние годы многочисленные исследования посвящены глобальному потеплению климата, которое наблюдается как процесс постепенного роста средней годовой температуры поверхности Земли и Мирового океана. Для объяснения причин глобального потепления климата привлекаются обширные экспериментальные наблюдения, построены модели изменений климата и выдвинуто множество теорий. К основной причине изменения климата Земли относят солнечную активность. Важным элементом сложной цепи действия солнечной активности на климат является опосредованное влияние Солнца через солнечный ветер, который модулирует различные процессы, происходящие в межпланетном пространстве, атмосфере Земли и в ее недрах. Одновременное, часто противоположное, действие многих космофизических и геофизических факторов, особенно в 11 летнем цикле солнечной активности, усложняет картину атмосферных процессов, обуславливающих климатические изменения. В данной работе представлены результаты анализа длиннопериодных вариаций потока полной солнечной радиации в 17-24 циклах солнечной активности (1933 – 2017 гг) в связи с глобальным потеплением климата. Рассматриваются влияние космических лучей и вулканической активности на климат. Показано, что циклические вариации глобальной температуры связаны с солнечной активностью и объясняются механизмом действия потока полной солнечной радиации на атмосферу Земли, модулируемой солнечными и галактическими космическими лучами. Мощные вулканические извержения способны менять климат Земли, понизить ее температуру на 1-2 года, но это происходит крайне редко. Циклический процесс изменения климата Земли в 17-24 циклах солнечной активности не нарушается и обуславливается комбинированным эффектом солнечной и геофизической активности. В отсутствие трендов в космофизических факторах, влияющих на климат, процесс постепенного роста средней годовой температуры Земли в 21-24 циклах солнечной активности объясняется антропогенным фактором.

УСЛОВИЯ, В КОТОРЫХ БЫЛИ СДЕЛАНЫ ОТКРЫТИЯ А.Л.ЧИЖЕВСКОГО В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ДВИЖУЩЕЙСЯ КРОВИ, УПОРЯДОЧЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ЭРИТРОЦИТОВ В КРОВОТОКЕ

Голованов Д.Л., Голованова О.Д., Голованов А.Л.

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, dm_golovanov@mail.ru

Работы А.Л. Чижевского по электродинамике движущейся крови логически замыкают цепочку «солнечная активность – атмосферное электричество и геомагнитное поле – живые организмы, прежде всего, организм человека». И если первым двум аспектам – воздействию геологогеофизических факторов на живые организмы и атмосферному электричеству («отрицательным аэроионам») – преимущественно посвящены первые два 22-х летних этапа жизни и творчества А.Л. Чижевского (Голованов Д.Л. Голованов А.Л., 2016), то углубленным изучением внутренней электрической среды организма А.Л. Чижевский в значительной мере занимался на третьем этапе (Голованов Д.Л., 2018).

Условия, в которых проводились исследования, были далеки от «комфортных». С 1942 по 1950 год Чижевский по абсурдному обвинению находился в системе ГУЛАГа (Ивдельлаг, Кучинская шарашка, Карагандинские лагеря). С 1951 по 1958 – на поселении в Караганде. В лагерном фельдшерском пункте он организует лабораторию. Ему на помощь приходят другие репрессированные ученые – П.Г. Тихонов и Г.Н. Перлатов. При их поддержке он не только проводит эксперименты, но и создает стройную математическую модель структурно-функциональной упорядоченности эритроцитов в кровотоке, описывает систему сил, управляющих их движением: электрических, магнитных, гидродинамических и ван-дер-ваальсовых.

Доктор медицинских наук В.М. Вольская (1969) оценила значимость работ А.Л. Чижевского по крови на одном уровне с самым обнаружением явления кровообращения Уильямом Гарвеем в XVII веке.

Решающее влияние на физическое и творческое выживание А.Л. Чижевского в лагерях оказала встреча с Ниной Вадимовной Энгельгардт, носившей тогда фамилию Перешкольник по первому мужу. Именно благодаря ей первая часть трудов А.Л. Чижевского была опубликована в 1959 году (Чижевский, 1959), а остальные части увидели свет уже после смерти ученого (Чижевский, 1973; Чижевский, 1980).

1. *Вольская В.М.* Учение А.Л. Чижевского о крови как о целостной электродинамической системе и некоторые практические аспекты// Сб. «Солнце, электричество, жизнь». Материалы чтений секции физики МОИП, посвященных памяти проф. А. Л. Чижевского. М.: Изд. МГУ, 1969. — С.58-59.
2. *Голованов Д. Л.* ПОЛИГИМНИЯ ЗА КОЛЮЧЕЙ ПРОВОЛОКОЙ. Научное и художественно-поэтическое творчество А.Л. Чижевского в условиях заключения и ссылки (1942-1959) М.: Гелиос, 2018. — 45 с. — Гелиос Москва, 2018. — 45 с.
3. *Голованов Д. Л., Голованов А. Л.* Проявился ли 22-х летний период в творчестве А.Л. Чижевского? // Физика плазмы в Солнечной системе. Одиннадцатая ежегодная конференция. 15-19 февраля 2016 года. ИКИ РАН. Сборник тезисов. — ИКИ РАН Москва, 2016. — С. 190–190.
4. *Чижевский А.Л.* Структурный анализ движущейся крови. М.: Изд. АН СССР, 1959. 474 с.
5. *Чижевский А.Л.* Электрические и магнитные свойства эритроцитов. — М., 1973.
6. *Чижевский А.Л.* Биофизические механизмы реакции оседания эритроцитов. — Новосибирск: Наука, 1980.

ОБНАРУЖЕНИЕ А.Л. ЧИЖЕВСКИМ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА РЕАКЦИЮ ОСЕДАНИЯ ЭРИТРОЦИТОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭТОГО ЭФФЕКТА В НАШИ ДНИ

Гурфинкель Ю.И., Голованов Д.Л., Голованов А.Л.

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

Работы А.Л. Чижевского по электродинамике движущейся крови выполнены в 1942-1950 годах в условиях ГУЛАГа и в 1951-1958 – на поселении в Караганде (Чижевский, 1959, 1973, 1980).

В качестве диагностической характеристики свойств крови он предлагает использовать не одно фиксированное число, принятое в медицинской практике – СОЭ – скорость оседания эритроцитов – а саму форму кривой скорости оседания эритроцитов.

Современные технические возможности позволяют реализовать эту исключительно перспективную идею А.Л. Чижевского (Воейков и др., 1999).

Проведенные исследования позволили соединить два направления исследований в русле идей А.Л. Чижевского: работы по крови и влияние на организм гелиогеофизических факторов (Gurfinkel Yu I, et al., 1995; Гурфинкель, Любимов, 2004).

Изучение состояния капиллярного кровотока у 144 пациентов с ишемической болезнью сердца (ИБС) подтверждают это: чем более выражена тяжесть состояния пациентов, тем значительней расстройства микроциркуляции наблюдались в период геомагнитных возмущений (*Гурфинкель и др.*, 1995). Наибольшая выраженность нарушений капиллярного кровотока отмечена у больных ИБС, протекающей на фоне сахарного диабета, а также у пациентов с перенесенным ранее инфарктом миокарда и у лиц с повторными инфарктами миокарда, осложненными сердечной недостаточностью. Тогда как у менее тяжелых пациентов со стенокардией или с пароксизмальной формой трепетания предсердий нарушения капиллярного кровотока были достоверно ниже.

Складывается впечатление, что эндотелиальная функция является частью физиологического механизма адаптации сердечно-сосудистой системы к меняющимся внешним условиям (в нашем случае к изменениям геомагнитной активности).

Появление новых инструментальных возможностей для исследования СОЭ, СРПВ и ЭФ в динамике, вероятно, позволит получить более полное представление о физиологических и патологических изменениях состояния сердечно-сосудистой системы человека в зависимости от изменений космической погоды.

1. Влияние геомагнитных возмущений на капиллярный кровоток у больных ишемической болезнью сердца / Ю. И. Гурфинкель, В. В. Любимов, В. Н. Ораевский и др. — Препринт №1 (1051) М.: ИЗМИРАН, 1994. — 26 с.
2. Воейков В.Л., Гурфинкель Ю.И., Дмитриев А.Ю., Кондаков С.Э. Устройство для автоматической регистрации осаждения крови. Патент #2128945, 20 апреля **1999**.
3. *Гурфинкель Ю. И., Любимов В. В. Связь геомагнитных возмущений с показателями капиллярного кровотока у больных ишемической болезнью сердца // Экономика и производство / Журнал организаторов производства / Журнал депонированных рукописей. — 2004. — № 8.*
4. *Чижевский А.Л.* Структурный анализ движущейся крови. М.: Изд. АН СССР, 1959.
5. *Чижевский А.Л.* Электрические и магнитные свойства эритроцитов. — М., 1973.
6. *Чижевский А.Л.* Биофизические механизмы реакции оседания эритроцитов. — Новосибирск: Наука, 1980.
7. Gurfinkel Yu I, et al. Effects of geomagnetic disturbances on capillary blood flow in patients with coronary artery disease // Biophysics. Pergamon, 1995. Vol.40, No. 4, P. 777-783

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА УХОДЯЩИЙ ДЛИННОВОЛНОВЫЙ ПОТОК

Молодых С.И., Жеребцов Г.А., Караханян А.А.
ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, asha@iszf.irk.ru

Естественные изменения глобальной приповерхностной температуры обусловлены, в первую очередь, влиянием вариаций солнечной и вулканической активности. Поскольку прямое энергетическое воздействие потока солнечного излучения на приповерхностную температуру существенно меньше влияния углекислого газа [1], идут поиски параметрических механизмов, при которых небольшие воздействия могут приводить к существенным изменениям климатической системы. К таким механизмам можно отнести модель воздействия солнечной активности на климатическую систему [2], в которой предполагается, что вариации солнечной активности через изменения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля влияют на магнитосферную конвекцию, которая, в свою очередь, влияет на распределение разности электрического потенциала между ионосферой и Землей. Отметим, что вариации параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля воздействуют также и на геомагнитную активность, именно поэтому ее можно использовать в качестве индикатора солнечной активности. Далее, изменения разности электрических потенциалов ионосфера–Земля приводят к перестройке вертикального профиля объемного электрического заряда, который влияет на состояние водяного пара (основного парникового газа) и, следовательно, на уходящий длинноволновый поток.

В данной работе на основе результатов реанализа NCEP/NCAR проведены расчеты вариаций интегральной функции пропускания для уходящей длинноволновой радиации в атмосфере во время гелиогеофизических возмущений. При расчетах была использована параметризация уходящей длинноволновой радиации для климатических моделей [3] с учетом механизма воздействия солнечной активности на атмосферу Земли, приведенного в [2]. В качестве индикатора солнечной активности выбран *PC*-индекс геомагнитной активности – http://www.geophys.aari.ru/pc_about.html, который разработан для контроля магнитной активности в полярной шапке, обусловленной геоэффективным солнечным ветром, и описывает межпланетное электрическое поле, влияющее на магнитосферу [4].

Проведен расчет вариаций потока длинноволнового излучения на верхней границе атмосферы и построены карты распределения данного потока. Для проведения сравнительного анализа были построены карты температуры нижнего слоя тропосферы. Сопоставление карт уходящего потока с распределением температуры показало хорошее согласие между изменениями пространственной структуры рассматриваемых характеристик.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16, при частичной поддержке программы Президиума РАН № 51 «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования».

1. Mokhov, I.I., Smirnov, D.A., Karpenko, A.A. // Dokl. Earth Sci. 2012. V. 443, N 1. P. 381–387.
2. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Рубцова О.А. // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1042–1050.
3. Мохов И.И., Петухов В.К. / Препринт. М.: ИФА РАН, 1978. 34 с.
4. Troshichev O.A., Andrezen V.G., Vennerstrom S., Friis-Christensen E. // Planet. Space Sci. 1988. V. 36, N 11. P. 1095–1102.

**ИЗМЕНЕНИЯ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ В ЦИКЛЕ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА
(ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)**

Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Вьюшкова Т.Ю., Туниянц Т.И.

Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО) Росгидромета

г. Долгопрудный М.о., Россия krivolutsky@mail.ru

Приводятся результаты численного моделирования изменений химического нейтрального и заряженного состава атмосферы Земли, вызванных вариациями УФ радиации Солнца в цикле его активности. Для расчетов отклика на вариации УФ радиации использована глобальная фотохимическая модель CHARM-I (Chemical Atmospheric Research Model with Ions [1]), созданная в Лаборатории химии и динамики атмосферы ЦАО. Результаты расчетов показали, что изменения электронной концентрации в нижней ионосфере (область D), обусловленные циклом активности Солнца, могут составить 30% величины в освещенной полусфере Земли.

[1] Криволуцкий и др. Трехмерная глобальная численная фотохимическая модель CHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы. Геомагнетизм и аэронавигация, том 55, №4, 2015

[2] Криволуцкий и др. Глобальная циркуляция атмосферы Земли на высотах от 0 до 135 км, рассчитанная с помощью модели ARM. Учет процессов солнечной активности. Геомагнетизм и аэронавигация, том 55, №6, 2015

**РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЛЕДНИКОВЫХ ЩИТОВ
ГРЕНЛАНДИИ И АНТАРКТИДЫ И ТЕНДЕНЦИЯ ПОХОЛОДАНИЯ В ПОСЛЕДНИЕ
~ 2000 ЛЕТ**

Дергачев В.А., Криволуцкий А.А.

*Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО) Росгидромета, г.Долгопрудный М.О.,
Россия krivolutsky@mail.ru*

.....Понимание будущего изменения климата, исходя из астрономической теории палеоклимата, связано с изучением прошлой изменчивости климата. Сейчас человечество живёт в тёплом ледниково-межледниковом периоде (Голоцен), который развивался после отступления последнего ледникового периода, начавшегося 19-17 тыс. лет назад. Поскольку это межледниковье продолжается уже более 10 тыс. лет, встаёт вопрос о времени окончания Голоцена и предстоящем начале нового оледенения. В настоящее время ещё нет ясного понимания того, что управляет длиной каждого межледниковья, и нет пока никакого точного его аналога, поэтому получение детальной картины изменчивости климата имеет важную научную и практическую значимость.

.....Получение детальной информации о закономерностях изменения климата связано с изучением ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды, океанических отложений и непрерывных земных прокси данных. Долгосрочные непрерывные данные изменчивости температур Гренландского и Антарктического материкового льда дают ценную информацию о картине климатической изменчивости во временные интервалы перехода от ледниковых условий к межледниковым и наоборот. Гренландские и Антарктические температурные реконструкции, охватывающие прошлые 2000 лет, могут помочь лучше оценить естественный и антропогенный вклад в изменение климата и проследить изменения климата в регионах Гренландии и Антарктиды.

.....Палеоклиматические характеристики и тенденции изменения климата важны для понимания эволюции климата и служат всеобъемлющей основой, чтобы лучше понять десятилетние и столетние температурные колебания и потенциальные будущие глобальные температурные изменения.

О СВЯЗИ ЦИРКУЛЯЦИИ ТРОПОСФЕРЫ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ СО СМЕНОЙ ГРАНИЦ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Куколева А.А., Кононова Н.К., Криволуцкий А.А., Вальчук Т.Е.

ЦАО Росгидромет, Московская область, г. Долгопрудный, Россия, kuan-2012@yandex.ru

Связь циркуляции нижней атмосферы и смены секторов межпланетного магнитного поля (ММП) в околоземном пространстве была отмечена, например, в работе [1]. Цель представляемого исследования – попытаться найти эту связь на основе данных о продолжительности разных форм элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) по типизации Б.Л. Дзердзиевского [2]. Всего согласно [2] существует 4 группы циркуляции: зональная, нарушение зональности (НЗ), меридиональная северная (МС) и меридиональная южная (МЮ) и 13 подтипов внутри групп. Информация о фазах 27-дневного цикла смены секторов ММП (+ и -) представлена в [3].

Были рассчитаны значения повторяемости (f) разных форм циркуляции в отдельные фазы ММП на Земле на основе данных за 2006, 2008 и 2014 годы. Дни с возмущенной геомагнитной обстановкой были исключены из рассмотрения. Проведено сравнение повторяемости ЭЦМ в разные фазы ММП с соответствующими среднегодовыми значениями. Получены следующие результаты.

Распределение повторяемости ЭЦМ по видам (зональная, нарушение зональности (НЗ), меридиональная северная (МС) и меридиональная южная (МЮ)) в целом соответствует среднему распределению в году.

В переходных фазах (-/+ и +/-) ММП отклонения повторяемости от средней различны по знаку и величине. Самые значительные результаты из полученных следующие.

В 2008 г. повторяемость циркуляции группы НЗ выше среднего значения на 5-15%, а МС и МЮ – ниже на 7-10%. В 2006 и 2014 гг. f группы МЮ ниже среднегодовых значений на 7% при переходе (-/+) и выше – при обратной смене направления ММП.

В работе [1] показано, что примерно через сутки после пересечения Землей границы сектора ММП уменьшается площадь тропосферных ложбин. В представляемой работе также была проанализирована повторяемость подтипов ЭЦМ через сутки после смены сектора ММП. Оказалось, что при переходе (+/-) в 2 раза снижена повторяемость ЭЦМ 8 (МС) и 13 (МЮ), и повышена у ЭЦМ 12 (МС). При обратном переходе (-/+) повышена повторяемость для ЭЦМ 4 (НЗ), 11 (МС) и 13 (МЮ) и снижена для ЭЦМ 10 (МС).

Отдельно рассмотрена повторяемость ЭЦМ при смене секторов зимой. В холодный сезон значительно - до 28-30% - вырастает f для двух подтипов меридиональной северной группы (№11 и 12), соответствующие среднегодовые значения - (13-20) %.

Полученные результаты качественно подтверждают выводы [1], однако их значимость невысока. Для установления надежной связи ЭЦМ и фаз ММП предполагается расширить выборку.

1. Wilcox J.M. Solar magnetic structure: Influence on stratospheric circulation. // Science. 1973. V. 180. P. 185-186.
2. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов северного полушария по Б.Л.Дзердзиевскому. Российская акад. наук, Ин-т географии. – М. Воентехиниздат, 2009. 372 с. [<http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/>]
3. Ишков В.Н. ИЗМИРАН Москва: <http://www.izmiran.ru/services/saf/archive/ru/>

КОЛЕБАНИЯ НА СОЛНЦЕ, В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ И ИХ СВЯЗЬ С КОЛЕБАНИЯМИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ АНОМАЛИЙ И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, tvkuz3@gmail.com

Ранее в [1] мы анализировали спектры скорости V и модуля межпланетного магнитного поля ММП B в солнечном ветре (рассчитанные на основе измерений V и B вблизи орбиты земли) и солнечной активности W (числа Вольфа), чтобы установить связь периодов колебаний на солнце и в межпланетной среде. Колебания с периодом $T=1.3$ г. были обнаружены в скорости вращения Солнца у основания зоны конвекции [2], а с $T=1.040$ г. в магнитном поле солнца как звезды [3]. Мы обнаружили в спектре W мощные колебания с $T=1.0135$ г.=370 дней [1]. Природа этих колебаний до сих пор неясна, поэтому одной из целей данной работы был поиск их в солнечном ветре. Основная же цель настоящего исследования – выделить в спектрах V и B колебания лунного и солнечного происхождения и найти их отклик в спектрах аномалий температуры и скорости вращения земли.

Амплитуды обсуждаемых в спектре B компонент имеют доверительный уровень больше 99.8%. Самая мощная в спектре B компонента имеет $T=198$ л; в спектрах W есть ее гармоники с $T=16.5$ л, $T=22$ г и $T=11$ л. В спектре B есть также нестационарная компонента с $T=10.8$ л спектра W . Известный период Ригера, выделенный в данных мощных солнечных вспышек в спектре B имеет $T=151.6$ д. и является одной из гармоник 10.8-летнего цикла. Показано, что в спектре B обсуждаемые солнечные колебания с $T=1.3$ г. и $T=370$ д. являются гармониками магнитного цикла солнца с $T=22.3$ г., причем $T=1.040$ г. Котова и $T=1.3$ г находятся в резонансном соотношении 5/4 (т.е. являются и гармониками колебаний с $T=5.2$ г, которые есть в наших спектрах W). Следующая по мощности компонента спектра B имеет $T=8.77$ л, равный периоду обращения перигелия орбиты Луны при ее движении вокруг Земли. Показано также, что спектр B содержит гармоники периода 18.6л вращения узлов лунной орбиты с $T=3.73$, $T=1.32$ лет и $T=141.6$ дней. Таким образом анализ показывает, что перечисленные периоды спектра B имеют солнечно-лунное происхождение. Так период Ригера 151.6 д. в спектре B является одновременно гармоникой 10.8-л. солнечного цикла и лунного с периодом 18.6 л. В спектре V лунное влияние еще очевиднее. Самая мощная компонента в V имеет $T=54$ г., а ее 5я гармоника $T=10.8$ л. Следующая по мощности компонента с $T=9.3$ г. является 2й гармоникой 18.6-летнего цикла Луны; этот цикл имеет в спектре V мощные гармоники с $T=1.3$ г., $T=1.55$ л. и $T=7.7$ г. Компоненты спектра V в основном имеют солнечно-лунное происхождение. Показано, что основные периоды колебаний в спектрах солнечного ветра могут быть объяснены астрономическими периодами, связанными с движением Юпитера, Венеры и Сатурна. Обсуждаются периоды в спектрах аномалий температуры и скорости вращения земли, которые можно объяснить астрономическими периодами, обнаруженными в спектрах W , B и V . Результаты позволяют сделать вывод о наличии соизмеримости периодов средних движений в системе Солнце-Луна-Земля и этих планет. Возможный физический механизм обсуждается. Результаты имеют также прикладное значение при анализе измерений параметров солнечного ветра космическими аппаратами.

1. Kuznetsova T.V. and Tsirulnik L. B. // J. Atmosph. Solar Terr. Phys. 2008. V. **70**. P. 254.
2. Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill, F., et al.// Science 2000. V. **287**. P. 2456.
3. Котов В.Г.//Известия Академии наук, Серия физическая 1999. Т. **63** (11). С. 2134.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Мальнева И.В., Черкесов А.А.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (ФГБУ «ВГИ») malnir@mail.ru

В последнее десятилетие неуклонно растет количество катастрофических событий как в мире в целом, так и в отдельных странах. Многие катастрофические природные процессы связаны с проявлением опасных геологических процессов – оползней, селей и др. Изменилась активность природных процессов, наиболее чувствительных к погодным условиям. Для оперативного прогнозирования опасных природных процессов необходимо обращать особое внимание на предпосылки и факторы, которые позволили бы за достаточный отрезок времени до проявления процесса предупредить население о возможной катастрофе. При этом следует обратить внимание на некоторые, зависящие от периодических проявлений активности процессов на Солнце, показатели параметров солнечно-земных связей. В первую очередь это скорость плазмы солнечного ветра в космическом пространстве и плотность протонов в нем. Солнечный ветер является основным агентом, посредством которого активные процессы на Солнце влияют на состояние околоземного пространства, геомагнитосферы и приповерхностной области Земли. Это дополнительный источник энергии при развитии опасных природных процессов. Основные параметры плазмы геоэффективного солнечного ветра вблизи орбиты Земли имеют следующие характерные значения: скорость 300–800 км/с и более; концентрация протонов в плазме солнечного ветра чаще всего $0,1 - 10 \text{ см}^{-3}$. Анализ данных по скорости солнечного ветра позволяет отметить ее увеличение в периоды активизации катастрофических природных процессов.

Можно отметить следующие фактические данные. Скорость солнечного ветра во время катастрофического проявления селей в июле 2000 г. по р. Герхожансу в Кабардино-Балкарии достигала 800 – 1000 км/с, плотность протонов - $14 - 22 \text{ ед./см}^3$. Во время обвала ледника Колка 18 – 19 сентября 2002 г. скорость солнечного ветра была более 700 км/с. 7 июля 2012 года произошло катастрофическое наводнение в Крымске (Северный Кавказ). С 1 июля 2012 г. до катастрофы скорость солнечного ветра была более 650 км/с. В ночь на 1 сентября 2017 г. катастрофический селевой поток прошел по долинам рек Адылсу и Баксан. Скорость солнечного ветра составляла до 670 км/с. и более.

В течение трех лет (2016 – 2018 гг.) в режиме онлайн велись наблюдения за указанными показателями космической погоды (сайт <http://spaceweather.com/>) и метеорологическими условиями в Приэльбрусье, в частности, влиянием скорости и плотности солнечного ветра на тропосферные атмосферно-электрические и грозовые характеристики. Исследовалась связь влияния солнечного ветра на состояние ионосферы и как следствие на электрическое поле приземной атмосферы. Метод контроля электрического поля атмосферы под действием солнечного ветра, развитый в ВГИ, основан на регистрации электрических характеристик атмосферы, на высоте 3 тыс. метров над уровнем моря, в экологически незагрязненном районе (пик Чегет в Приэльбрусье), при синхронном мониторинге погодных явлений на территории исследования. Данные исследования имеют большое значение для оценки грозовой и ливневой деятельности – важнейшего фактора развития опасных природных процессов в Приэльбрусье. Работа в этом направлении будет продолжаться.

Указанные показатели параметров космической погоды целесообразно использовать для оперативных прогнозов наводнений, оползней, селей и других катастрофических природных процессов (заблаговременностью 2 – 3 дня).

**РОЛЬ ВЫСЫПАЮЩИХСЯ В АТМОСФЕРУ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЕЙ**

Миронова И.А.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, i.a.mironova@spbu.ru

Роль высыпающихся из радиационных поясов электронов в вариациях озона и климатических изменениях до сих пор не ясна по причине того, что реальные скорости ионизации атмосферы под воздействием этих частиц неизвестны. Один из поднимаемых дискуссионных вопросов связан с диапазоном энергий электронов, которые могут быть наиболее или наименее значимыми для изменений атмосферных химических компонент полярной атмосферы. В данной работе обсуждаются процессы связанные с ионизацией атмосферы и изменением химического состава. Отдельно рассматриваются различные спектры потоков электронов из данных полученных во время баллонных измерений и наблюдений со спутников, также рассматриваются спектры восстановленные с использованием геомагнитных индексов. Ионизация создаваемая тормозным излучением также принимается во внимание.

ВАРИАЦИИ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ В ЦИКЛЕ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА

Миронова И.А., Криволуцкий А.А.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, i.a.mironova@spbu.ru

Регрессионный анализ данных о серебристых облаках и параметров солнечной активности (среднегодовые значения чисел Вольфа и поток протонов с энергией более 30 МэВ) за период 1960-1990 г.г. выявил противофазность этих параметров. Моделирование температурного режима и циркуляции средней атмосферы, показало, что учет воздействия ВГВ приводит к появлению области низких температур на мезосферных высотах летом, что способствует образованию серебристых высот. Моделирование воздействия солнечных протонных событий (разрушающих озон и меняющих зональную циркуляцию) показало, что эффект воздействия приводит к ослаблению воздействия ВГВ и, таким образом, относительному нагреванию мезосферы, препятствующему образованию облаков.

SMALL SIZE GLEs: EVIDENCE OF ACCELERATION BY CME-DRIVEN SHOCKS

C. Li, L.I. Miroshnichenko, V.G. Yanke

1.N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, 108840, Russia, M.V.

2.Lomonosov Moscow State University, D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP), 119234 Moscow, Russia, leonty@izmiran.ru.

We present the results of systematical empirical search for small size GLEs (“hidden”, or sub-GLEs) by the data of ground-based observations for the period of solar cycle 24. Starting point of this research is a hypothesis that small size GLEs may be indicative of acceleration of SEPs by CME-driven shocks [1-3]. Crucial parameter for resolving the problem seems to be a SEP energy spectrum [1-3] at the Earth’s orbit measured by spacecraft detectors and ground-based neutron monitors (NM). We try to recover the SEP spectrum in a wide range of energies – from GOES non-relativistic energy channels to relativistic range by the NM data and by relevant measurements on ground-based non-standard CR (mainly muon) installation. The main factors that may determine the SEP intensity and spectrum shape near the Earth are the source power and location, IMF turbulence level, and/or shock strength. Every “suspected” small GLE is analyzed separately. Finally, we compile a Table of statistically confirmed small GLEs and give our interpretation within the frame of above hypothesis. The results emphasize once more the importance of studying the GLEs of low intensity (“hidden GLEs”) [4] for better understanding the SEP spectrum formation, especially in the range of relativistic energies.

1. Li, C., Firoz, K.A., Sun, L.P., Miroshnichenko, L.I. Electron and proton acceleration during the first GLE event of solar cycle 24. - *Astrophys. J.*, **770**, 34 (11 pp.), [doi: 10.1088/0004-637X/770/1/34](https://doi.org/10.1088/0004-637X/770/1/34), 2013.
2. Li, C., L.I. Miroshnichenko, C. Fang. Proton activity of the Sun in current solar cycle 24. *Research in Astronomy & Astrophysics (RAA, China)*, **15**, 1036-1044, doi: 10.1088/1674-4527/15/7/011, 2015.
3. Li, C., L.I. Miroshnichenko, V.E. Sdobnov. Small size GLE of 6 January 2014: Acceleration by CME-driven shock? - *Solar Phys.*, **291**, 975–987, doi: 10.1007/s11207-016-0871-8, 2016.
4. L.I. Miroshnichenko, V.G. Yanke. Size distributions of solar proton events: Methodological and physical restrictions. - *Solar Physics*, **291**, 3685–3704, doi: 10.1007/s11207-016-1002-2, 2016.

ИЗМЕНЕНИЯ ВПОЛЯРНОЙ ОЗОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ, ВЫЗВАННЫЕ ПРОТОННОЙ АКТИВНОСТЬЮ СОЛНЦА (ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

Криволуцкий А.А., Мягкова И. Н., Гинзбург Е.А., Вьюшкова Т.Ю., Куколева А.А.
НИИЯФ им. Д.В. Скобелева МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия,
irina@srd.sinp.msu.ru

Солнечные Протонные События (СПС) по современным представлениям вызывают при торможении попадающих в полярные области частиц высоких энергий (солнечных космических лучей), приводят к возмущению ионно-нейтральных фотохимических процессов, что, в свою очередь, приводит к дополнительному образованию окислов азота и водорода, разрушающих озон в стратосфере и мезосфере. Образование азотных окислов, имеющих большое (химическое) время жизни может приводить при этом к долговременным изменениям в озоносфере. Представлены результаты трехмерного фотохимического и динамического моделирования воздействия наиболее сильных СПС, произошедших в 2012 и 2017 годах. Для реализации численного сценария была использована трехмерная глобальная фотохимическая модель, (CHARM [1]) а также модель общей циркуляции ARM [2], созданные в лаборатории химии и динамики атмосферы ЦАО. Приведены рассчитанные изменения в содержании озона и окислов азота. Показано, что разрушение озона было меньше, чем после наиболее сильных СПС 23-го цикла активности Солнца. Проведено предварительное сравнение данных измерений потоков энергичных частиц, измеренных со спутников «Метеор» и GOES.

[1] Криволуцкий и др. Трехмерная глобальная численная фотохимическая модель CHARM. Учет процессов солнечной активности. Геомагнетизм и аэронауки, том 55, №1, 2015

[2] Криволуцкий и др. Глобальная циркуляция атмосферы Земли на высотах от 0 до 135 км, рассчитанная с помощью модели ARM. Учет процессов солнечной активности. Геомагнетизм и аэронауки, том 55, №6, 2015

ПРОЯВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛУНЫ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ МАГНИТНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИЗМИРАН

Шибает И. Г., Гарбацевич В. А.

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

Значения вариаций лунных составляющих сравнительно невелики и составляют 1-2 нТл для горизонтальных / вертикальных компонент вектора магнитного поля и слабо зависят от долготы. На средних широтах эти малые вариации маскируются другими сигналами. Естественно, что более четкого проявления влияния Луны следует ожидать при наибольшем сближении её с Землей и, особенно, если эти моменты совпадают или близки с моментами «новолуния» / «полнолуния». Таким образом, для настоящего времени – эпохи «суперлуния», эта зависимость должна быть максимальной. Также, нынешний период низкой солнечной активности является благоприятным для подобных исследований.

В работе оценивается проявление лунных параметров в магнитном поле Земли по данным двух измерительных комплексов магнитной обсерватории ИЗМИРАН :

- цифровая кварцевая магнито-вариационная станция серии «Кварц» для измерения относительных вариаций H, D, Z – компонент магнитного поля (разработка ИЗМИРАН), разрешающая способность 0.1 нТл. со временем дискретизации 1 сек. ;
- цифровой протонный магнитометр регистрирует полный модуль магнитного поля с разрешающей способностью 0.01 нТл., измерения производятся в 3-х секундном режиме.

Спектральный анализ часовых показаний H, D, Z компонент проведен за 2015 – 2017 гг. Для получения более убедительных результатов получен спектр Dst индекса геомагнитной активности за тот же период (wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/). Использование этого индекса не ограничивается только периодами геомагнитных бурь, также и в спокойные периоды геомагнитной активности для характеристики геомагнитных вариаций широко привлекаются непрерывные ряды его часовых значений, как наиболее чувствительного индикатора. В спектре Dst индекса явно проявились как основной лунный период, так и период фаз Луны.

Анализ дисперсионных свойств исследуемых рядов позволил во многих случаях оценить и конкретно связать магнитные отклики данных протонного магнитометра с параметрами лунной орбиты. Отмечена модуляция показаний периодом около года. В работе проведен статистический анализ основных параметров лунной орбиты.

ЗАВИСИМОСТЬ ПЕРИОДА КВАЗИДВУХЛЕТНИХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ (КДО) ОТ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

И.П. Габис, О.А. Трошичев

ААНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия, olegtro@aari.nw.ru

Квазидвухлетние осцилляции (КДО) зонального ветра экваториальной стратосферы, то есть регулярное чередование восточного и западного воздушных потоков, наблюдаются в диапазоне широт $\pm 12^\circ$ вдоль всего экватора в слое ~ 16 км до ~ 40 км. Экваториальные КДО являются существенной частью глобальной циркуляции земной атмосферы и оказывают значительное воздействие на множество различных процессов не только в тропической зоне, но и в средне- и высокоширотной тропосфере и стратосфере. Это обуславливает важность долгосрочного прогноза КДО и прогноза их влияния на погоду и климат Земли. Для прогнозирования КДО наиболее перспективно использование сезонных закономерностей изменения ветра КДО. Вопрос о зависимости КДО от сезонного или годового цикла (точная сезонная «синхронизация» или только сезонная «модуляция») является предметом постоянных дискуссий на протяжении последних ~ 40 лет. Кроме того, в настоящее время проблема сезонных характеристик КДО получила дополнительное внимание благодаря исследованиям, прогнозирующим рост периода КДО в связи с глобальным потеплением и будущими климатическими изменениями.

Чередование восточных и западных воздушных потоков в ходе цикла КДО является следствием последовательного спуска ветровых режимов противоположных направлений, и период цикла КДО, определяемый по изменению направления ветра, должен зависеть от скорости спуска ветровых режимов. Представленный в работе анализ изменений скорости спуска ветра по ежедневным измерениям (данные высотного радиозондирования из каталога IGRA, Integrated Global Radiosonde Archive [1, 2]) позволил выявить характерные неизвестные ранее особенности, которые невозможно определить с помощью традиционно используемых среднемесячных данных о КДО. Показано, что спуск восточного ветра всегда происходит с резко изменяющейся в процессе спуска скоростью. При этом по ежедневным данным эти изменения в 70% случаев были зафиксированы во второй половине марта, июня, сентября и декабря. Вблизи мартовского или сентябрьского равноденствия скорость спуска резко возрастает, а вблизи июньского или декабрьского солнцестояния скорость спуска столь же резко уменьшается. В последнем случае часто наблюдается нулевая скорость спуска или даже подъем нижней границы восточного ветра. Следствием данных закономерностей является вывод об определяющем влиянии скорости спуска восточного ветра на период цикла КДО.

Обнаруженный факт также свидетельствует о том, что астрономические моменты солнцестояния и равноденствия являются ключевыми датами для изменения скорости спуска восточного ветра в ходе КДО. Это позволяет предположить зависимость КДО от интенсивности солнечного УФ излучения. Изменения состояния экваториальной стратосферы (вариации меридиональной циркуляции, вертикального распределения озона, температуры, и др.), обусловленные изменениями потока УФ в течение интервалов от солнцестояния (равноденствия) к равноденствию (солнцестоянию), могут быть причиной, определяющей скорость эволюции КДО в ходе каждого цикла КДО. Кроме того, вариации УФ излучения Солнца, связанные с изменениями солнечной активности на средних (2-3 года) и длинных (~ 11 лет) периодах, могут быть причиной различной интенсивности спуска восточного ветрового режима в разных циклах КДО.

1. Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA). <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/weather-balloon/integrated-global-radiosonde-archive>.
2. Durre, I., R. S. Vose, D. B. Wuertz. 2006. Overview of the Integrated Global Radiosonde Archive // Journal of Climate. Vol. 19, N. 1. P. 53.

МАКСИМУМ 24 ЦИКЛА СА В МАГНИТНЫХ БУРЯХ

Вальчук Т.Е., Кононова Н.К.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, tatiana_valchuk_1948@mail.ru

В 24 цикле солнечной активности по данным о числах Вольфа отображена ветвь роста текущего цикла, фаза максимума – это 2015 год, когда проявления магнитных бурь (МБ) (по материалам обсерваторий Москва и Болдер) были наиболее многочисленны. По завершению 2015г. следует фаза спада 24 цикла, предшествующая минимуму этого текущего цикла. В 2015г. нами выделены и подробно исследованы характеристики всех протекших 25 умеренных магнитных бурь (УМБ), 3-х больших магнитных бурь (БМБ) и 2-х очень больших МБ (ОББ). Произведен сравнительный анализ прохождения МБ и чередования в их протекании элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ). Получен разброс соответствия времени протекания МБ и ЭЦМ для 20 УМБ: полное совпадение интервалов выявлено только для 4-х УМБ: №14, №7, №18 и №22. В остальных случаях наблюдаются расхождения временных интервалов.

- 1) Из 20 рассмотренных **УМБ** начало и конец бури совпадает с началом и концом ЭЦМ: № 14, № 7, № 18, № 22.
- 2) Совпадает начало, ЭЦМ длится дольше, чем буря : № 2, № 13.
- 3) Совпадает с концом ЭЦМ : № 5, № 9, № 17.
- 4) Длится несколько ЭЦМ, совпадает с началом первого и кончается раньше последнего : № 6, № 10.
- 5) Буря попадает в середину действия ЭЦМ: № 11, № 12, № 15, № 19, № 20.
- 6) Начинается в середине первого ЭЦМ, кончается в начале второго: № 14.
- 7) Начало бури совпадает с концом одного ЭЦМ, а конец – с началом следующего – № 21, № 23, № 25.

БМБ

Начало приходится на середину одного ЭЦМ, а конец – на начало другого – № 4.

Начало и конец бури совпадает с началом и концом ЭЦМ: № 16.

Начинается в начале первого ЭЦМ, кончается в начале второго: № 24.

ОББ

Совпадает начало, ЭЦМ длится дольше, чем буря: № 3.

Буря попадает в середину действия ЭЦМ: № 8.

Причины вариаций - в энергетике магнитосферных и метеорологических процессов взаимодействия.

ПРОЯВЛЕНИЕ И ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ~60-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА В ДИНАМИКЕ СОЛНЕЧНО-АТМОСФЕРНЫХ СВЯЗЕЙ

Веретененко С.В., Огурцов М.Г.

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

Продолжено исследование возможных причин временной изменчивости корреляционных связей между характеристиками нижней атмосферы и вариациями солнечной активности. Показано, что ~60-летняя периодичность, обнаруженная во временном ходе коэффициентов корреляции между давлением тропосферы в умеренных и высоких широтах (развитием внетропических барических систем) и числом солнечных пятен, тесно связана с изменениями эпох крупномасштабной атмосферной циркуляции. Обращения знака коэффициентов корреляции совпадают по времени с переломными точками в эволюции основных форм циркуляции (согласно классификации Вангенгейма-Гирса) в североатлантическом и тихоокеанском регионах. В свою очередь, смена эпох циркуляции связана с вариациями интенсивности стратосферного циркумполярного вихря, которые также характеризуются ~60-летней периодичностью. Предположено, что вероятной причиной наблюдаемой временной изменчивости эффектов солнечной активности (вариаций галактических космических лучей) в развитии внетропических барических систем являются изменения характера взаимодействия тропосферы и стратосферы посредством планетарных волн при переходах циркумполярного вихря от сильного к слабому состоянию и наоборот.

В качестве возможной причины изменений состояния циркумполярного вихря рассмотрены долговременные изменения интегрального потока солнечной радиации (TSI). Обнаружены доминирующие гармоники с периодами ~80 и ~60 лет в вариациях TSI согласно реконструкции Хойта и Шаттена [1], модифицированной в работе Скафетты и Вилсона [2]. Показано, что с вариациями TSI за последние 150 лет хорошо согласуется временной ход аномалий глобальной температуры и изменения режима крупномасштабной циркуляции. Полученные результаты позволяют предположить, что одной из возможных причин изменений состояния циркумполярного вихря и соответствующих перестроек крупномасштабной циркуляции являются долговременные вариации прихода солнечной радиации.

1. Hoyt D.V., Schatten K.H. // J. Geophys. Res. 1993. V. **98** (A11). P. 18895.
2. Scafetta N., Willson R.C. // Astrophys. Space Sci. 2014. V. **350**(2). P. 421.

**БАЗЫ ДАННЫХ МИРОВЫХ ЦЕНТРОВ ДАННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ОКОЛОЗЕМНОЕ
КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО**

Сергеева Н.А.¹, Ишков В.Н.², Забаринская Л.П.¹

¹*Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия, nata@wdcb.ru*

²*ИЗМИРАН, Троицк, г. Москва, Россия*

Развитие исследований по солнечно-земной физике в значительной степени базируется на знаниях о солнечных активных явлениях, их воздействию на физические процессы во внутренней гелиосфере и через них на околоземное космическое пространство. При этом вся эта система рассматривается как единая лабораторная установка, в которой отдельные наземные обсерватории, как солнечные, так и магнитные, наряду со специализированными космическими аппаратами образуют систему датчиков, на основании которой мы судим о процессах в околоземном космическом пространстве.

Современные научные исследования основываются на комплексном анализе больших объемов данных из разных областей науки и на применении современных компьютерных методов обработки, анализа и интерпретации данных. Сеть Мировых центров данных по солнечно-земной физике (в Москве – МЦД по СЗФ) обеспечивает свободный доступ к большим массивам данных, к длинным рядам наблюдений по солнечно-земной и космической физике, в том числе к результатам наблюдений за солнечной активностью, межпланетным магнитным полем и магнитным полем и ионосферой Земли.

В докладе приводятся описания и веб-адреса современных каталогов и баз данных по солнечно-земной физике.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ГЦ РАН № 0145-2019-0004.

**ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ:
ИССЛЕДОВАНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ И
ЧИСЛЕННОГО МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Подгорный И.М.¹, Подгорный А.И.²

¹*ИНАСАН, г. Москва, Россия, podgorny@inasan.ru*

²*ФИАН, г. Москва, Россия, podgorny@lebedev.ru*

Во время солнечной вспышки за несколько десятков минут освобождается магнитная энергия $\sim 10^{32}$ эрг, которая переходит в тепловую энергию нагретой до (30-50 МК) плазмы, кинетическую энергию корональных выбросов плазмы, энергию ускоренных заряженных частиц (протонов – до 20 МэВ) и энергию электромагнитного излучения в широком диапазоне. Наиболее интересным свойством солнечной вспышки является взрывное освобождение энергии высоко в солнечной короне – на высотах 15000 – 30000 км. Появление вспышки в короне объясняется освобождением энергии, накопленной в магнитном поле токового слоя, который образуется в окрестности особой линии магнитного поля Х-типа. Основываясь на механизме освобождения энергии в токовом слое, используя результаты численного моделирования и наблюдений, предложена электродинамическая модель солнечной вспышки, объясняющая ее основные наблюдаемые проявления. Источники жесткого рентгеновского излучения появляются вследствие торможения в нижних плотных слоях солнечной атмосферы пучков электронов в продольных токах, вызванных электрическим полем Холла в токовом слое. Для исследования вспышечной ситуации проводилось численное МГД моделирование над реальной активной областью. При постановке условий моделирования никаких предположений о механизме вспышки не делалось, все условия задавались из наблюдений. Несмотря на использование специально разработанных методов, реализованных в программе ПЕРЕСВЕТ, расчет в настоящее время удалось провести только в сильно сокращенном масштабе времени. Но даже в таком приближении расчет позволил установить появление токового слоя, положение которого совпадает с положением наблюдаемого источника теплового рентгеновского излучения. Сравнение спектра ускоренных протонов полученного расчетом траекторий в электрическом и магнитном полях, полученных МГД моделированием, показало, что ускорение солнечных космических лучей происходит в токовом слое электрическим полем $E = -V \times B/c$, а не в ударных волнах. Анализ динамики электронной температуры солнечной атмосферы в области появления солнечных вспышек дает независимое доказательство коронарного происхождения вспышки. Температура оценивалась по излучению спектральных линий, принадлежащих ионам железа высокой степени ионизации (FeXVIII, FeXXIII, FeXXIV и др.). Показано, что солнечной вспышке обычно предшествует появление над активной областью яркого светящегося образования с температурой $T \sim 6$ МК, т. е. значительно превышающей температуру короны. Это локальное образование (размером $\sim 10^{10}$ см), мы идентифицируем, как токовый слой в процессе аккумуляции магнитной энергии для вспышки. После нескольких десятков часов температура плазмы в месте вспышки резко возрастает, что приводит к возрастанию яркости наблюдаемого свечения над активной областью в линиях высокоионизованного железа и теплового рентгеновского излучения.

Моделирование в реальном масштабе времени должно позволить более точно сравнить положения появившихся токовых слоев с наблюдаемыми образованиями нагретой плазмы в линиях высокоионизованного железа и провести другие сопоставления, необходимые для дальнейшего изучения механизма солнечной вспышки. Для этой цели в настоящее время проводится распараллеливание расчета на специально собранном для решения этой задачи суперкомпьютере на базе многопроцессорной графической платы GPU Tesla M2050.