МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Родькин Денис Геннадьевич

МЕЖПЛАНЕТНЫЕ КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАССЫ И ИХ СВЯЗЬ С СОЛНЕЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Специальность 01.03.03 – «Физика Солнца»

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва-2020

Работа выполнена в ФГБУН Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, (Отделение оптики, Лаборатория «Рентгеновской астрономии Солнца»)

Научный	Слемзин Владимир Алексеевич,
руководитель:	доктор физмат. наук
Официальные оппоненты:	Филиппов Борис Петрович, доктор физмат. наук, ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им Н.В. Пушкова РАН, Отдел физики Солнца и солнечно- земных связей, главный научный сотрудник Калегаев Владимир Владимирович, доктор физ мат. наук, ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, зав. Лабораторией космофизических исследований.

Отдел космических наук

Зимовец Иван Викторович, кандидат физ.-мат. наук, ФГБУН Институт космических исследований РАН, Отдел физики космической плазмы, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «23» декабря 2020 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета МГУ.01.05 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5, 19 корп., аудитория 2-15.

E-mail: nav19iv@gmail.com

С диссертацией, а также со сведениями о регистрации участия в удаленном интерактивном режиме в защите можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <u>http://istina.msu.ru/dissertations/333128076/</u>

Автореферат разослан: «____» ноября 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета канд. физ.-мат. наук

Н.А. Власова

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее разработанности

Солнечный ветер (CB) – истекающий из солнечной короны поток плазмы – является основным компонентом космической среды в околосолнечном пространстве. Возмущения в CB, возникающие вследствие солнечной активности, порождают геомагнитные бури и изменения в состоянии верхней атмосферы Земли, влияющие на работоспособность космических аппаратов и сложных технических систем на Земле.

В связи с потребностями надежных прогнозов космической погоды, возрастает интерес к исследованиям, посвященным идентификации источников ветра в короне Солнца и определению связи их характеристик с параметрами соответствующих компонент СВ. При этом преимуществом обладают оптические наблюдения, которые заключаются в получении наиболее ранних данных для диагностики корональных солнечных структур и последующего среднесрочного (3-5 суток) прогноза параметров потоков CB.

Плазма солнечной короны имеет высокую температуру порядка миллионов градусов Кельвина, поэтому основным источником информации о короне и происходящих в ней явлениях является излучение в вакуумно-ультрафиолетовой (ВУФ) области спектра, регистрируемое телескопами и спектрометрами на космических аппаратах (КОРОНАС [1], STEREO [2], SOHO [3], SDO [4] и т.д.). механизмов Ключевым методом исследования формирования спектров и определения параметров в источнике излучения является спектроскопическая диагностика плазмы, а одной из используемых при этом концепций является понятие дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ) [5]. Анализ ДМЭ является важной частью разработанного в ФИАНе в рамках программы КОРОНАС метода изображающей спектроскопии Солнца в рентгеновском и ВУФ диапазонах спектра [6]. ДМЭ определяется как наиболее вероятное распределение по температуре меры эмиссии плазмы, соответствующее измеренным интенсивностям ВУФ излучения в спектральных разнотемпературных каналах В предположении локального термодинамического равновесия (ЛТР). В случае многокомпонентной плазмы метод ДМЭ позволяет разделить компоненты по температуре, а также обнаружить присутствие

3

нетепловых компонент излучения, вызванных внешними источниками.

Идентификация источников СВ проводится с помощью сопоставления структуры ветра, измеряемой вблизи Земли или других планет солнечной системы, с корональными структурами на Солнце с учетом задержки на время движения СВ в гелиосфере. Существуют различные источники СВ на Солнце, приводящие к образованию 3-x крупномасштабных типов потоков: квазистационарных высокоскоростных потоков (ВСП), потоков медленного СВ и транзиентных потоков СВ (межпланетные корональные выбросы массы – МКВМ). Кроме крупномасштабных потоков, рассматриваются также возмущения СВ, возникающие при взаимодействии перечисленных потоков: ударные волны, области сжатия и их комбинации с основными потоками, гелиосферные токовые слои (ГТС или англ. "HCS").

ВСП ассоциируются с областями открытого магнитного поля (корональные дыры – КД) [7-9]. Медленный СВ распространяется в поясе и цепочках корональных стримеров, а также истекает из активных областей, границ низкоширотных КД и областей спокойного Солнца, в которых проявляется мелкомасштабная солнечная активность [8, 10-14]. МКВМ – относительно сложные по структуре магнитоплазменные сгустки, регистрируемые в СВ, ассоциируются с корональными выбросами массы (КВМ) [15-17].

КВМ, представляющие из себя расширяющиеся магнитные жгуты или облака, формируются в результате эрупции протуберанцев или волокон и могут сопровождаться вспышками или происходить без вспышек и визуально наблюдаются в короне по оптическим наблюдениям [18, 19, 20]. Создаваемые ими МКВМ, которые фиксируются по плазменным параметрам непосредственно при прохождении потока СВ через прибор, в том числе на орбите Земли, отличаются повышенной плотностью, скоростью и напряженностью магнитного поля и обладают высокой геоэффективностью, т.е. вызывают значительные возмущения магнитосферы, приводящие к возникновению умеренных и сильных магнитных бурь. Таким образом, исследование свойств МКВМ и разработка надежных методов их прогнозирования являются актуальными задачами.

В настоящее время для прогнозирования параметров КВМ/МКВМ разрабатываются различные эмпирические и

4

магнитогидродинамические модели [21-25]. Несмотря на десятилетия исследований, точность среднесрочного (3 - 5 дней) прогнозирования прихода МКВМ недостаточна, и наблюдаются случаи значительных отклонений наблюдаемых параметров от Причиной является прогнозируемых. недостаточное знание процессов формирования КВМ в солнечных источниках и отсутствие данных о структуре МКВМ в гелиосфере. Поскольку источники СВ формируются в солнечной короне, для улучшения точности оперативности прогнозов И их наиболее перспективным представляется использование данных постоянного мониторинга короны в ВУФ диапазоне с космических аппаратов наряду с коронографическими наблюдениями в видимом диапазоне и мониторингом фотосферного магнитного поля. В этой связи, для улучшения точности прогнозирования весьма актуально изучение факторов, влияющих на параметры МКВМ, начиная с формирования КВМ в короне Солнца, так и при движении КВМ в гелиосфере.

При исследовании источников потоков СВ одним из ключевых параметров является ионный состав плазмы, зависящий от типа формирования источника условий плазменного И потока. Особенности ионного состава для разных типов потоков СВ приводятся в работах [26-29]. На начальном этапе формирования КВМ в нижней короне Солнца плазма имеет большую плотность и в состоянии ЛТР. В этих условиях находится зарядовое распределение ионов определяется балансом процессов ионизации и рекомбинации в соответствии с температурой и плотностью плазмы, которые в свою очередь зависят от соотношения скоростей ее нагрева и охлаждения. При расширении плазмы КВМ до нескольких солнечных радиусов от центра Солнца [30, 31] ее плотность падает на 3-4 порядка, и плазма переходит в бесстолкновительный режим. При этом ее ионный состав "замораживается" и сохраняется неизменным при движении в гелиосфере вплоть до момента регистрации МКВМ у Земли. Изучение ионного состава МКВМ и его связи с характеристиками солнечных источников очень важно, поскольку по ионному составу можно идентифицировать тип источника КВМ, а также определить механизмы нагрева и охлаждения эруптирующей плазмы при прохождении через корону.

Для прогнозирования параметров MKBM важное значение, помимо исследования одиночных (единичных) структур, имеет учет воздействия КВМ на другие КВМ или на ВСП в короне и гелиосфере. Такое взаимодействие может привести к образованию комплексных (множественных) магнитоплазменных структур, а также значительно повлиять на кинематические параметры МКВМ. В таких случаях ионный состав является важным индикатором, который можно использовать для коррекции теоретических моделей МКВМ и оценки их геоэффективности.

Цель и задачи исследования

Цель работы – определение ионного состава плазмы КВМ в солнечной короне, как одного из важных параметров при установлении связи МКВМ в гелиосфере с характеристиками их солнечных источников.

В работе решены следующие задачи:

1) проведена спектроскопическая диагностика плазмы корональных структур – источников КВМ – на основе которой определены плотность и температура плазмы, а в последствии и ионный состава; 2) разработан метод прогноза ионного состава плазмы КВМ/МКВМ на основе данных спектроскопической диагностики и МГД-моделирования;

3) определены характеристики комплексных транзиентных структур CB, образующихся при взаимодействии KBM с другими потоками CB в гелиосфере;

4) установлена степень влияния взаимодействия потоков CB на геоэффективность МКВМ – комплексные структуры с большей вероятностью вызывают умеренные и сильные магнитные бури.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования в диссертационной работе являются одиночные (образующиеся в отсутствие взаимодействия потоков CB) и комплексные (образующиеся в результате взаимодействия потоков CB) структуры. Предметом исследования являются ионный состав КВМ/МВКМ и его прогнозирование, а также характеристики комплексных потоков CB и их геоэффективность.

Научная новизна

1. Изучено формирование МКВМ от образования КВМ в короне до регистрации транзиента СВ на орбите Земли на основе рассмотрения ионного состава, который позволяет определить как процессы в

источнике KBM, так и охарактеризовать взаимодействие KBM с другими потоками CB в гелиосфере, что влияет на геоэффективность MKBM.

2. Разработан метод расчета ионного состава МКВМ, основанный на рассмотрении эволюции плазмы выброса в солнечной короне по данным спектроскопической диагностики в ВУФ диапазоне спектра, 3D МГД моделирования и оптических коронографических наблюдений.

3. Определены признаки возможного взаимодействия КВМ с другими потоками СВ в гелиосфере. Такими признаками являются: 1) наличие нескольких КВМ, одновременно распространяющихся в близких направлениях и пересекающихся в гелиосфере; 2) образование комплексной структуры, имеющей сложный профиль параметров ионного состава; 3) увеличенная в 1.8 – 2.5 раза длительность комплексного транзиента по сравнению с одиночным (1.12 дня).

4. Исходя из анализа особенностей параметров МКВМ в событиях 2010 - 2011 гг., предложена классификация комплексных структур СВ, образующихся в результате КВМ-КВМ и КВМ-ВСП взаимодействия: 1) КВМ-КВМ со слабым взаимодействием (МС1-тип); 2) КВМ-КВМ с сильным взаимодействием (МС2-тип); 3) КВМ-ВСП взаимодействие (МС3-тип).

5. Впервые показано, что комплексные транзиентные структуры CB, образующиеся в результате сильного взаимодействия КВМ с КВМ и КВМ с ВСП в гелиосфере имеют повышенную геоэффективность, а также чаще вызывают значительные Форбуш-понижения по сравнению с одиночными МКВМ, что обусловлено большей длительностью комплексного транзиента и большими средними значениями южной компоненты магнитного поля B_s и электрического поля солнечного ветра (v×B_s) в пределах транзиента.

Теоретическая и практическая значимость

Предложенный в диссертации метод использования ионного состава плазмы КВМ/МКВМ, формируемого в условиях ЛТР в нижней короне Солнца (до 4 – 5 радиусов от центра), в качестве универсального параметра дает возможность охарактеризовать все стадии развития КВМ/МКВМ от момента начала эрупции до регистрации возмущения в СВ, включая возможное взаимодействие

потоков в гелиосфере. Таким образом, ионный состав плазмы КВМ/МКВМ может быть использован в качестве контрольного параметра при разработке следующего поколения более точных численных моделей прогнозирования.

Результаты работы имеют практическое значение для улучшения методов среднесрочного прогнозирования космической погоды на основе регулярных оптических наблюдений Солнца и могут быть применены организациями, занимающимися мониторингом Солнца и прогнозированием космической погоды – НИИЯФ, ИКИ РАН, ИЗМИРАН, ИПГ, ИСЗФ, ГАО РАН.

Методология диссертационного исследования

Основным методическим подходом, примененным в диссертации, является рассмотрение ионного состава плазмы МКВМ на этапе формирования КВМ в солнечной короне и его распространения в гелиосфере вплоть до регистрации космическим аппаратом. Поскольку на границе короны и гелиосферы ионный состав "замораживается", такой подход дает возможность изучить процессы образования плазмы КВМ в короне, а также особенности взаимодействия потоков СВ.

Проведенные в диссертации исследования опираются на труды зарубежных и отечественных ученых, рассматривавших вопросы формирования плазмы КВМ в солнечной короне, а также изучавших МКВМ в гелиосфере и анализировавших их влияния на околоземную обстановку.

В работе применялись развитые в последние годы методы спектроскопической диагностики и 3D МГД моделирования процессов в короне Солнца. Для анализа использовались данные с космических аппаратов SDO, ACE, Wind, STEREO, GOES и SOHO, а также каталоги по KBM – CDAW, SEEDS, Cactus, и база данных по транзиентным событиям, составленная Я. Ричардсоном и Х. Кейн.

Для уточнения численных расчетов эволюции параметров плазмы КВМ в короне Солнца проводилось их сопоставление с данными прямых измерений.

Для обработки наблюдательных данных с космических аппаратов и визуализации конечного научного результата использовался программный пакет Solar-Soft Ware (SSW) в среде программирования IDL.

Положения, выносимые на защиту

1. Расчет ионного состава корональных выбросов массы (КВМ) с помощью диагностики плазмы выброса и анализа ее эволюции в короне по данным оптических наблюдений, позволяющий получить значения среднего заряда ионов железа $\langle Q_{Fe} \rangle$ в солнечном ветре (СВ), совпадающие в пределах точности с данными измерений в межпланетных КВМ (МКВМ) на орбите Земли. Результат расчета для МКВМ 4 августа 2011 г.: $\langle Q_{Fe} \rangle = 10 \pm 1$, измерено: 10.1 ± 0.6; для МКВМ 26 февраля 2011 г.: $\langle Q_{Fe} \rangle = 14 \pm 1$ и 14.16 ± 0.6, соответственно.

2. Эффект понижения среднего заряда ионов железа (<Q_{Fe}>) в плазме МКВМ по сравнению с рассчитанным по параметрам коронального источника с <Q_{Fe}> \geq 12 до 10, при формировании КВМ в активной области вблизи корональной дыры (КД). Предложенный механизм эффекта – охлаждение плазмы вследствие пересоединения силовых линий магнитного жгута с открытыми магнитными линиями КД.

3. Признаки взаимодействия транзиентных и квазистационарных потоков СВ в гелиосфере: 1) по оптическим наблюдениям обнаружение нескольких источников возмущения СВ - потоков КВМ и высокоскоростным потоком (ВСП), движущихся в близких направлениях и по кинематике пересекающихся в гелиосфере; 2) по ионному составу СВ – увеличение в 1.8 – 2.5 раза длительности образовавшегося комплексного транзиента СВ по сравнению со среднестатистической длительностью одиночного МКВМ (1.12 дня). 4. Обнаружение комплексных эруптивных структур, образованных в гелиосфере при сильном взаимодействии КВМ-КВМ (МС2-тип) и (МС3-тип), вызывающих умеренные и сильные КВМ-ВСП геомагнитные возмущения с Dst <-50 нТл с большей вероятностью (в 2010 - 2011 гг. – 6 из 7 случаев, 85%), чем одиночные события (2 из 12, 16%). Установление причины этого эффекта, заключающейся в большей длительности комплексного транзиента и значительных средних значениях южной компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) и электрического поля СВ.

5. Обнаружение эффекта, заключающегося в том, что комплексные эруптивные структуры с большей вероятностью (в 2010 - 2011 гг. – 8 из 11 структур, 73%) вызывают Форбуш-понижения (ФП), чем одиночные МКВМ (5 из 12, 41%), при этом амплитуды ФП растет с

увеличением произведения длительности комплексной структуры CB на среднюю магнитуду ММП.

Достоверность полученных результатов

Достоверность представленных в диссертации результатов обеспечивается использованием наиболее надежных данных наблюдений Солнца и CB, полученных с KA ACE, Wind, SDO, SOHO; применением STEREO и современных И широко используемых в области физики Солниа методов анализа материала с наблюдательного помошью спектроскопической диагностики и 3D МГД моделирования; согласием полученных данных наблюдений и численного моделирования, а также их соответствием результатам современных мировых исследований в области физики Солнца и СВ.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены на всероссийских и международных конференциях:

1. 6-ая Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, ФИАН, Москва, Россия, 15 - 20 ноября 2015 г.

2. 11-ая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, Россия, 15 - 19 февраля 2016 г.

3. 1-st VarSITI General Symposium, Альбена, Болгария, 6 - 10 июня 2016 г.

4. 12-ая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, Россия, 6 - 10 февраля 2017 г.

5. European Geosciences Union General Assembly, Вена, Австрия, 23 - 28 апреля 2017.

6. 2-nd VarSITI General Symposium, Иркутск, Россия, 10 - 15 июля 2017 г.

7. 13-ая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, Россия, 12 - 16 февраля 2018 г.

 Конференция SolarWind 15, Брюссель, Бельгия, 17-22 июня 2018 г.
14th Quadrennial Solar-Terrestrial Physics Symposium, Торонто, Канада, 9 -13 июля 2018 г.

10. 14-ая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, Россия, 11 - 15 февраля 2019 г.

11. 15-ая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, Россия, 10 - 14 февраля 2020 г.

Результаты данного исследования неоднократно докладывались на научных семинарах в ФИАН, ГАИШ и НИИЯФ.

Личный вклад автора

Автор активно участвовал в постановке задач диссертации и разработке методов их решения, его роль была определяющей в обработке и анализе наблюдательных данных и интерпретации полученных результатов, выносимых на защиту.

В ходе работы автором были выполнены: 1) анализ кинематики и диагностика плазмы КВМ в событии 2 августа 2010 г. с МГД-моделирования; 3D использованием результатов 2) спектроскопическая диагностика плазмы КВМ по данным ВУФ наблюдений на космической обсерватории SDO с применением анализа температурного распределения ДМЭ в исследовании события 24 февраля 2011 г.; 3) анализ параметров СВ, включая ионный состав, по данным аппаратов ACE, Wind, STEREO и составление каталога МКВМ с идентификацией источников и данными по ионному составу для периода 2010 - 2011 гг.; 4) классификации разработка типов плазменных структур, образованных в результате взаимодействий потоков СВ, на основе анализа параметров ионного состава; 5) исследование геоэффективности комплексных (составных) транзиентных структур СВ; 6) подготовка к публикации полученных результатов.

Использованные в работе численные расчеты параметров плазмы с помощью идеальной 3D МГД модели для события 2 августа 2011 г. были выполнены Paolo Pagano на суперкомпьютере в University of St. Andrews (Англия, Шотландия). Расчеты среднего заряда ионов плазмы КВМ по уравнениям ионизационно-рекомбинационного баланса для событий 2 августа и 24 февраля 2011 г. были проведены Ф.Г. Горяевым (ФИАН). Автором были поставлены задачи этих расчетов, предоставлены исходные данные, а в ходе выполнения расчетов проводилось сопоставление промежуточных результатов с данными измерений.

Вклад автора при подготовке основных публикаций (A1-A7) и докладов для конференций являлся определяющим.

Публикации по теме

Результаты работы изложены в 7 статьях (А1 – А7) в рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science, SCOPUS, RSCI/РИНЦ и входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК. Полный список работ приведен в разделе "Список работ по теме диссертации" (стр. 20).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из 3-х глав, введения, заключения. благодарности, списка сокращений, списка публикаций автора по диссертации (7 наименований) теме И списка литературы, содержащего 97 наименований. Общий объем диссертации составляет 104 страницы. В тексте содержится 10 таблиц и 32 рисунка.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации обоснована актуальность исследуемой проблемы и степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены методология исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

Глава 1 состоит из 4-х разделов и посвящена идентификации МКВМ в гелиосфере и анализу их источников в солнечной короне с спектроскопической помошью диагностики по оптическим наблюдениям в ВУФ диапазоне. Рассмотрена идентификация спектроскопической солнечных источников КВМ метод И диагностики плазмы КВМ с использованием распределения ДМЭ и его применение для диагностики структур корональной плазмы [А1-A41.

В разделе 1.1 описаны основные признаки МКВМ, а также исследовалась статистика МКВМ и их связь с солнечной активностью (КВМ, вспышками и числом солнечных пятен) [A1, A2]. В соответствии с этим, показана разница между 23-м и 24-м СЦ. В частности, продемонстрировано, что в максимумах солнечной активности частота возникновения КВМ со вспышками коррелирует с числом солнечных пятен, в то время как в минимуме между 23-м и 24-м СЦ число КВМ без вспышек увеличивается. При высокой активности годовые числа МКВМ коррелируют с числами КВМ, однако в глубоком минимуме (2007 -2008 гг.) число МКВМ значительно уменьшается, так как слабые возмущения СВ от преобладающих в этот период медленных и узких КВМ практически сливаются с потоком медленного СВ.

В разделе 1.2 описан метод идентификации солнечных источников для МКВМ по оптическим наблюдениям плазменных структур в короне и гелиосфере в период 2010 - 2011 гг [A1].

выполнена идентификация корональных источников Была МКВМ, наблюдавшихся на околоземных космических аппаратах (КА) ACE [32] и Wind [33] в период 2010 - 2011 гг. В качестве базового источника данных при исследовании транзиентных событий использовался каталог, составленный Я. Ричардсоном [http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/ Кейн и Х. icmetable2.htm]. Потенциальные КВМ - источники МКВМ выделялись по временным рамкам запаздывания возмущений СВ, рассчитываемым по баллистической модели движения с постоянной скоростью. Для выделения КВМ, направленных к Земле, использовались коронографические изображения, полученные с КА STEREO [2], LASCO [3] и SDO [4] (из-за их удобного взаимного расположения в рассматриваемый период), совместно с моделями распространения СВ в гелиосфере и каталогами транзиентных событий. Вспышки, ассоциированные с КВМ, идентифицировались по их возникновению в пределах часа от момента старта КВМ.

В разделе 1.3 рассматривается метод спектроскопической диагностики солнечной плазмы с помощью анализа температурного распределения ДМЭ [А3, А4]. Представлено определение концепции ДМЭ, используемой при спектроскопической диагностике плазмы. Рассмотрен метод Плоумана (Plowman, [34]), использованный в данной работе для восстановления распределения ДМЭ по ВУФ изображениям солнечной короны в 6 ВУФ каналах (94 Å, 131 Å, 171 Å, 193 Å, 211 Å, 335 Å) телескопа АІА (КА SDO), и дано обоснование выбора этих каналов в качестве исходных при расчете температурного распределения ДМЭ плазмы корональных структур в интервале $log_{10}(T) = 5.5 - 7.5$ (T = 0.3 - 30 MK). Для корректного

восстановления функции ДМЭ корональной плазмы над солнечным лимбом при обработке данных добавлены процедуры коррекции рассеянного света и компенсации расхождения изображений в разных каналах в случае расширяющейся плазмы КВМ. Точность получаемой функции ДМЭ составила \pm 30 - 35% по величине меры эмиссии и \pm 0.1 по величине $\log_{10}(T)$. Анализ формы распределения ДМЭ приведен в работах [A3, A4].

В разделе 1.4 приведены основные выводы к главе 1.

<u>Глава 2</u> состоит из 4-х разделов и посвящена рассмотрению нагрева плазмы КВМ и расчету его ионного состава в нижней короне Солнца по данным спектроскопической диагностики и 3D МГД моделирования [A2, A4, A5].

В разделе 2.1 рассматривается ионный состав КВМ/МКВМ и его формирование в солнечной короне в области столкновений до области "замораживания". Приведены основные параметры, характеризующие зарядовое состояние ионов СВ и их типичные значения для МКВМ, схема формирования и методика расчета зарядового состояния плазмы КВМ на основе баланса ионизации и рекомбинации ионов при охлаждении и ускорении расширяющейся плазмы в условиях ЛТР [A2, A5].

расчета KBM Для эволюции ионного состава плазмы уравнения были использованы кинетические баланса: $\frac{\partial y_i}{\partial t} = N_e [y_{i-1}C_{i-1}(T_e) - y_i (C_i(T_e) + R_{i-1}(T_e)) + y_{i+1}R_i(T_e)], \sum_i y_i = 1$, где y_i – относительные обилия ионов, N_e и T_e – электронные плотность и температура, C_i и R_i – скорости ионизации и рекомбинации (в единицах см³×сек⁻¹), соответственно. C_i и R_i являются функциями температуры и вычисляются в предположении максвелловского распределения электронов плазмы по скоростям. Эволюция у_i при движении плазмы от Солнца зависит от электронной температуры Т_е, электронной плотности N_e и скорости плазмы V.

В разделах 2.2 и 2.3 подробно был рассмотрен расчет среднего заряда железа ($\langle Q_{Fe} \rangle$) с использованием начальных условий, полученных 2-мя методами: 1) с помощью 3D МГД-моделирования [A5] и 2) с помощью спектроскопической диагностики плазмы методом восстановления функции ДМЭ по ВУФ изображениям короны [A4].

В разделе 2.2 описаны результаты комплексного исследования серии МКВМ, зарегистрированных 4 - 7 августа 2011 г., и их источников на Солнце [А5]. Подробно изучено формирование КВМ от 2 августа 2011 г. с помощью обработанных ВУФ изображений Солнца с прибора SDO/AIA и МГД моделирования.

На первом этапе исследования была получена конфигурация коронального магнитного поля с помощью данных фотосферного магнитного поля (прибор SDO/HMI) на основе временного ряда бессиловых полей (NLFF). нелинейных Далее проводилось сравнение полученной конфигурации магнитного поля с положением петель по ВУФ данным SDO/AIA. В соответствии с результатом сравнения шла корректировка входных параметров с дальнейшим перерасчётом. В итоге была получена конечная конфигурацию коронального магнитного поля и использована в качестве начального условия для 3D МГД-моделирования. По схожей схеме (расчет – сравнение – корректировка - расчет) проводился второй этап – МГДмоделирование. В результате 3D МГД моделирования были получены плотность и температура плазмы, которые в дальнейшем были использованы при расчёте эволюции плазмы в короне и ионного состава КВМ в области "замораживания". Рассчитанные значения (< Q_{Fe} > = 10±1) хорошо согласуются с измеренными в МКВМ у Земли ($\langle Q_{Fe} \rangle = 10.1 \pm 0.6$).

В разделе 2.3 описаны результаты исследования формирования КВМ при эрупции протуберанца 24 февраля 2011 г. и исследовано зарядового формирование состояния ионов железа. зарегистрированного в МКВМ вблизи Земли [А4]. С помощью спектроскопической диагностики по распределению ДМЭ была оценена температура и плотность плазмы медленной и быстрой частей расширяющегося протуберанца (T = 12 MK, n = $8*10^8$ см⁻³ и T = 8 МК, $n = 6*10^8$ см⁻³). При этом выполнялась компенсация временных сдвигов структур, вызванных движением плазмы. Полученные в ходе оценки значения температуры и плотности эруптирующей плазмы были использованы для расчета ионного состава МКВМ (рис. 1).



Рисунок 1. Параметры плазмы КВМ. а) изменение скорости с высотой, б) изменение померенной и экстраполированной температуры с высотой, в) изменение электронной плотности с высотой [A4].



Рисунок 2. а) Изменение смоделированного среднего заряда ионов железа с высотой; б) Сравнение смоделированного ("modeled") распределения заряда железа и измеренного ("observed") для 24 февраля 2011 г [A4].

Рассчитанное значение среднего заряда ионов железа ($\langle Q_{Fe} \rangle = 14 \pm 1$) совпало с измеренным в СВ вблизи Земли ($\langle Q_{Fe} \rangle = 14.16 \pm 0.6$) в пределах точности измерения (рис. 2а,б). При этом наблюдается бимодальность распределения ионов железа, которая объясняется тем, что скорости рекомбинации для низких и высоких зарядовых состояний ионов железа различны, вследствие чего замораживание происходит на разных расстояниях.

В разделе 2.4 приведены основные выводы к главе 2.

<u>Глава 3</u> состоит из 5-и разделов и посвящена КВМ-КВМ и КВМ-ВСП взаимодействию в короне и гелиосфере, формированию комплексных структур СВ и исследованию влияния этих структур на Землю [A1, A2, A6, A7]. Показана важность исследования взаимовлияния разных корональных структур и источников СВ в короне для улучшения методов прогнозирования всех типов потоков CB.

В разделе 3.1 на примере 2-х событий июня – июля 2012 г. рассмотрено взаимодействие в солнечной короне формирующегося КВМ с высокоскоростным потоком из КД на ионный состав МКВМ [А6]. Продемонстрировано, что в случае события 8 - 10 июня 2012 г. взаимодействие потоков привело к понижению заряда ионов величин, соответствующих плазмы КВМ до потоку BCΠ $(\langle O^{7+}/O^{6+}\rangle = 0.39 \pm 0.14, \langle Q_{Fe}\rangle = 10.2 \pm 0.4)$, которое может быть вызвано магнитным пересоединением и понижением электронной результат температуры плазмы. Показано. что КВМ-ВСП взаимодействия в короне зависит от структуры магнитных полей и расстояния между источниками, что нужно учитывать при прогнозировании параметров МКВМ вблизи Земли.

В разделе 3.2 приводится анализ транзиентов и их солнечных источников в период 2010-2011 г.г. Было обнаружено, что из 23 событий, 12 (≈ 52%) имеют один, а 11 (≈ 48%) - два или более источников на Солнце (рис.3а) [А1]. В случаях множественных источников транзиент представляет собой сложную комплексную образующуюся взаимодействии структуру, при нескольких плазменных потоков в гелиосфере, параметры которой значительно отличаются от одиночного МКВМ. Исходя из ионного состава, измеренного около Земли, предложена классификация комплексных структур солнечного ветра, образующихся в результате КВМ-КВМ и КВМ-ВСП взаимодействия (множественные структуры - МС). Такие структуры характеризуются увеличенной продолжительностью по сравнению с одиночными событиями (1.12 дня) в 1.8 – 2.5 раза (рис. 3б) [А1, А2].



Рисунок 3. (а) Соотношение между числом единичных (ЕС) и множественных структур (МС) в период январь 2010 – август 2011 г.: МС1 и МС2 – при слабом и сильном взаимодействии КВМ-КВМ, соответственно, МС3 – при взаимодействии КВМ-ВСП КД; (б) средняя длительность ЕС и МС (в часах). МКВМ - группа событий из каталога МКВМ по данным КА АСЕ [А1, А2].

В разделе 3.3 рассмотрена геоэффективность комплексных структур, исследованных в период 2010 - 2011 гг. [А7]. В большинстве из рассмотренных случаев причиной возникновения умеренных и сильных магнитных бурь выступали комплексные события, образованные в результате сильного КВМ-КВМ взаимодействия (МС2-тип) или КВМ-ВСП взаимодействия (МС3-тип). Было получено, что 67% событий МС2-типа и 100% событий МС3-типа – вызвало умеренные и сильные бури, а в случае одиночных (ЕС), только 17% привело к умеренным бурям.

В разделе 3.4 была проанализирована способность одиночных и комплексных спорадических структур СВ вызывать Форбушпонижения (ФП) [А7]. Получено, что составные структуры чаще, чем одиночные КВМ, вызывают ФП. Для событий МС2-типа, обладающих высоким значением модуля ММП и большой продолжительностью, наблюдаются более высокие значения ФП. Показано, что величина ФП растет с увеличением произведения длительности комплексной структуры СВ на среднее значение ММП (рис. 4).



Рисунок 4. График зависимости амплитуды ФП от произведения модуля ММП (В) на длительность события (t). ЕС – единичная структура (крест), МС1 – слабое КВМ-КВМ взаимодействие (звезда), МС2 – сильное КВМ-КВМ взаимодействие (ромб), МС3 – КВМ-ВСП взаимодействие (треугольник) [А7].

В разделе 3.5 приведены основные выводы к главе 3.

<u>В Заключении</u> суммируются основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, и их значение для дальнейших исследований.

Основные результаты работы:

- 1. С помощью анализа ионного состава плазмы КВМ/МКВМ исследована эволюция плазмы от формирования в короне, прохождения в гелиосфере и до регистрации в околоземном пространстве. Для расчетов ионного состава использовались методы спектроскопической диагностики и 3D МГД моделирования. На примере событий 2 августа и 24 февраля 2011 г. показано, что рассчитанные посредством уравнений ионизационного баланса значения хорошо согласуются с измеренными в МКВМ у Земли.
- 2. Развит метод диагностики плазмы КВМ на этапе нагрева и ускорения плазмы в короне с помощью анализа температурного распределения ДМЭ, полученного по изображениям солнечной короны в разнотемпературных спектральных участках ВУФ диапазона с учетом кинематики.
- 3. Определены корональные источники МКВМ, зарегистрированных около Земли в период 2010 2011 гг. с использованием оптических данных КА STEREO, SDO и SOHO. Составлен расширенный каталог

МКВМ за этот период с включением данных об источниках, ионном составе и типах комплексных транзиентов.

- 4. Установлены признаки КВМ-КВМ и КВМ-ВСП взаимодействий в солнечном ветре: 1) существенно в 1.8 2.5 раза увеличенная длительность возмущения ионного состава СВ по сравнению со стандартной длительностью одиночного МКВМ; 2) наличие нескольких источников, которые формируют КВМ, движущиеся в попутных направлениях и пересекающиеся в гелиосфере.
- 5. Предложена классификация комплексных транзиентов, образующихся при взаимодействии КВМ с КВМ и ВСП, по структуре ионного состава. Типы взаимодействия нескольких потоков могут быть классифицированы как: 1) КВМ-КВМ со слабым взаимодействием (МС1); 2) КВМ-КВМ с сильным взаимодействием (МС2); 3) КВМ-ВСП взаимодействие (МС3).
- 6. Определено, что комплексные структуры МС2- и МС3-типов, связанные с взаимодействующими потоками СВ в период роста 24-го солнечного цикла (январь 2010 г. август 2011 г.), с большей вероятностью вызывают умеренные и сильные магнитные бури, что может быть связано с большей длительностью и большими значениями параметров <v×B_s> и <B_s> комплексных транзиентов этих типов.
- **7.** Определено, что комплексные структуры с большей вероятностью, чем одиночные КВМ, вызывают ФП. Величина ФП растет с ростом произведения среднего значения ММП на длительность комплексной структуры.

Список работ по теме диссертации

В рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science, SCOPUS, RSCI/РИНЦ и входящих в перечень ВАК:

[A1] Rodkin D., Slemzin V., Zhukov A.N., Goryaev F., Shugay Yu., Veselovsky I., Single ICMEs and Complex Transient Structures in the Solar wind in 2010-2011 // Solar Physics. 2018. V. 293. P. 78. Doi: 10.1007/s11207-018-1295-4. (Impact Factor=2.503)

[А2] Слемзин В.А., Горяев Ф.Ф., Родькин Д.Г., Шугай Ю.С., Кузин С.В., Образование и распространение плазменных потоков корональных выбросов массы в солнечной короне и гелиосфере // Физика плазмы. 2019. Том 45. №10. С. 1-35. (Impact Factor =1.008)

[A3] Goryaev F.F., Slemzin V.A., Rodkin D.G., D'Huys E., Podladchikova O., West M.J., Brightening and Darkening of the Extended Solar Corona during the Superflares of September 2017 // The Astrophysical Journal Letters. 2018. V. 856. P. L38. Doi: 10.3847/2041-8213/aab849. (Impact Factor =8.198)

[A4] Grechnev V., Kochanov A., Uralov A., Slemzin V., Rodkin D., Goryaev F., Kiselev V., Myshyakov I., Development of a Fast CME and Properties of a Related Interplanetary Transient // Solar Physics. 2019. V. 294. P. 139. Doi: 10.1007/s11207-019-1529-0. (Impact Factor =2.503)

[A5] Rodkin D., Goryaev F., Pagano P., Gibb G., Slemzin V., Shugay Yu., Veselovsky I., Mackay D.H., Origin and Ion Charge State Evolution of Solar Wind Transients during 4-7 August 2011 // Solar Physics. 2017. V. 292. P. 90. Doi: 10.1007/s11207-017-1109-0. (Impact Factor =2.503)

[А6] Родькин Д.Г., Шугай Ю.С., Слемзин В.А., Веселовский И.С., Взаимодействие высокоскоростного и транзиентного потоков солнечного ветра в максимуме 24 солнечного цикла // КСФ ФИАН. 2016. Том 43. №9. С. 44-49. (Impact Factor =0.325)

[А7] Родькин Д.Г., Слемзин В.А., Шугай Ю.С., Геомагнитные бури и Форбуш-понижения, связанные с одиночными и комплексными транзиентными структурами солнечного ветра // КСФ ФИАН. 2020. Том 47. №3. С. 36-43. (Impact Factor =0.325)

Список литературы

1. Кузнецов В.Д., «Проект КОРОНАС-Ф: исследование солнечной активности и ее воздействия на Землю». Солнечно-земная физика, Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2009, с. 10-35.

2. Howard R.A., Moses J.D., Vourlidas A., Newmark J.S., Socker D.G., Plunkett S.P., «Sun-Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI),» *Space Sci. Rev.*, v. 136, p. 67, 2008.

3. Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., Korendyke C.M., Michels D.J., Moses J.D., Socker D.G., Dere K.P., Lamy P.L., Llebaria A., Bout M.V., Schwenn R., Simnett G.M., Bedford D.K., Eyles C.J., «The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO),» *Solar Phys.*, v.162, p. 357, 1995.

4. Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., Boerner P.F., Chou C., Drake J.F., et.al., «The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO),» *Solar Phys.*, v.275, p. 17, 2012.

5. Pottasch S.R., «On the interpretation of the solar ultraviolet emission line soectrum,» *Space Sci. Rev.*, v. 3, p. 816, 1964.

6. Житник И.А., Кузин С.В., Богачев С.А., Бугаенко О.И., Иванов Ю.С., Игнатьев А.П., Крутов В.В., Митрофанов А.В., Опарин С.Н., Перцов А.А., Слемзин В.А., Суходрев Н.К., Собельман И.И., Урнов А.М., Шестов С.В., «Исследование активных процессов в солнечной короне методами изображающей спектроскопии в области 8-350А (эксперимент СПИРИТ)». Солнечно-земная физика, Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2009, с. 65-128.

7. Nolte J.T., Krieger A.S., Timothy A.F., Gold R.E., Roelof E.C., Vaiana G., Lazarus A.J., Sullivan J.D., McIntosh P.S., «Coronal Holes as Sources of Solar Wind,» *Solar Phys*, v. 46, p. 303, 1976.

8. Wang Y.M., «Semiempirical Models of the Slow and Fast SolarWind,» *Space Science Rev.*, v. 172, p. 123, 2012.

9. Cranmer S., «Coronal Holes», *Living Rev. Solar Phys.*, v. 6, p. 1, 2009. 10. Eselevich M., Eselevich V., Fujiki K., «Streamer Belt and Chains as the Main Sources of Quasi-Stationary Slow Solar Wind,» *Solar Phys.*, v. 240, p. 135, 2007.

11. Liewer P.C., Neugebauer M., Zurbuchen T.H., «Characteristics of Active-Region Sources of Solar Wind Near Solar Maximum,» *Solar Phys.*, v. 223, p. 209, 2004.

12. Riley P., Luhmann J.G., «Interplanetary Signatures of Unipolar Streamers and the Origin of the Slow Solar Wind,» *Solar Phys.*, v. 277, p. 355, 2012.

13. Slemzin V., Harra L., Urnov A., Kuzin S., Goryaev F., Berghmans D., «Signatures of Slow SolarWind Streams from Active Regions in the Inner Corona,» *Solar Phys.*, v. 286, p. 157, 2013.

14. Antiochos S.K., Mikić Z., Titov V.S., Lionello R., Linker J.A., «A Model for the Sources of the Slow Solar Wind,» *The Astrophys. J.*, v. 731, p. 112, 2011.

15. Richardson I.G., Cane H.V., «Identification of interplanetary coronal mass ejections at 1 AU using multiple solar wind plasma composition anomalies,» *J. Geophys. Res.*, v. 109, p. A09104, 2004.

16. Richardson I.G., Cane H.V., «Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 – 2009): Catalog and Summary of Properties,» Solar Phys., v. 264, p. 189, 2010.

17. Zurbuchen T.H., Richardson I.G., «In-situ solar wind and magnetic field signatures of interplanetary coronal mass ejections,» Space Sci. Rev., v. 123, p. 31, 2006.

18. Gosling J.T., Bame S.J., McComas D.J., Phillips J.L., «Coronal Mass Ejection and Large Geomagnetic Storms,» *Geophys. Res. Lett.*, v. 17, p. 901, 1990.

19. Webb D.F., Howard T.A., «Coronal Mass Ejections: Observations,» *Living Rev. Solar Phys.*, v. 9, p. 3, 2012.

20. Филиппов Б.П., «Эруптивные процессы на Солнце», М: ФИЗМАТЛИТ, 2007

21. Rouillard A.P., Lavraud B., Sheeley N.R., Davies J.A., Burlaga L.F., Savani N.P., Jacquey C., Forsyth R.J., «White light and in situ comparison of a forming merged interaction region,» Astrophys. J., v. 719, p. 1385, 2010.

22. Gopalswamy N., Lara A., Yashiro S., Kaiser M.L., Howard R.A., «Predicting the 1AU arrival times of coronal mass,» J. Geophys. Res., v. 106, p. 29207, 2001.

23. Vršnak B., Temmer M., Žic T., Taktakishvili A., Dumbović M., Möstl C., Odstrčil D., «Heliospheric propagation of coronal mass ejections: comparison of numerical WSA-Enlil+Cone model and analytical Drag-Based model,» Astrophys. J.: Supplement Ser., v. 213, p. 21, 2014.

24. Wold A.M., Mays M.L., Taktakishvili A., Jian L.K., Odstrcil D., Macneice P., «Verification of real-time WSA-ENLIL+Cone simulations of CME arrival-time at the CCMC from 2010 to 2016,» J. Space Weather Space Clim., v. 8, p. A17, 2018.

25. Mays M.L., Taktakishvili A., Pulkkinen A., MacNeice P.J., Rastätter L., Odstrcil D., Jian, L.K., Richardson I.G., LaSota J.A., Zheng Y., Kuznetsova M.M., «Ensemble Modeling of CMEs Using the WSA–ENLIL+Cone Model,» Solar Phys., v. 290, p. 1775, 2015.

26. Lepri S.T., Landi E., Zurbuchen T.H., «Solar wind heavy ions over solar cycle 23: ACE/SWICS measurements,» *Astrophys. J.*, v. 768, p. 94, 2013.

27. Gopalswamy N., Mäkelä P., Akiyama S., Xie H., Yashiro S., Reinard A.A., «The Solar Connection of Enhanced Heavy Ion Charge States in the Interplanetary Medium: Implications for the Flux-Rope Structure of CMEs,» *Solar Phys.*, v. 284, p. 17, 2013.

28. Zurbuchen T.H., Weberg M., von Steiger R., Mewaldt R.A., Lepri S.T., Antiochos S.K., «Composition of coronal mass ejections,» *Astrophys. J.*, v. 826, p. 10, 2016.

29. Zhao L., Zurbuchen T.H., Fisk L.A., «Global distribution of the solar wind during solar cycle 23: ACE observations,» *Geophys. Res. Lett.*, v. 36, p. L14104, 2009.

30. Rakowski C.E., Laming J.M., Lepri S.T., «Ion charge states in halo coronal mass ejections: what can we learn about the explosion?,» *Astrophys. J.*, v. 268, p. 602, 2007.

31. Gruesbeck J.R., Lepri S.T., Zurbuchen T.H., Antiochos S.K., «Constraints on coronal mass ejection evolution from in situ observations of ionic charge states,» *Astrophys. J.*, v. 730, p. 103, 2011.

32. Stone E.C., Frandsen A.M., Mewaldt R.A., Christian E.R., Margolies D., Ormes J.F., Snow F., «The advanced composition explorer,» *Space Sci. Rev.*, v. 86, p. 1, 1998.

33. Ogilvie K.W., Chornay D.J., Fritzenreiter R.J., Hunsaker F., Keller J., Lobell J., Miller G., Scudder J.D., Sittler E.C., Torbert R.B., Bodet D., Needell G., Lazarus A.J., Steinberg J.T., Tappan J.H., Mavretic A., Gergin E., «SWE, a comprehensive plasma instrument for the wind spacecraft,» *Space Sci. Rev.*, v. 71, p. 55, 1995.

34. Plowman J., Kankelborg C., Martens P., «Fast differential emission measure inversion of solar coronal data,» *Astrophys. J.*, v. 771, p. 2, 2013.