

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Родькина Дениса Геннадьевича
на тему: «Межпланетные корональные выбросы массы и их связь с
солнечными источниками»
по специальности 01.03.03 – «Физика Солнца»

Диссертационная работа Д.Г. Родькина посвящена исследованию возмущенных состояний солнечного ветра, связанных с межпланетными корональными выбросами массы (МКВМ), изучению их связи с источниками на Солнце, а также анализу геоэффективности МКВМ в зависимости от их характеристик. Тема работы, безусловно, важная и актуальная, поскольку до сих пор нет полного понимания механизмов формирования, распространения и взаимодействия КВМ/МКВМ в короне и межпланетной среде. В свою очередь, это препятствует построению надежных количественных среднесрочных (3-5 суток) прогнозов космической погоды, от влияния которой зависит самочувствие людей, функционирование различных технических систем и эффективность дальнейшего освоения и использования космического пространства.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, благодарностей, списка сокращений и двух библиографических списков, в первом из которых представлены публикации (7 штук) по теме диссертации с участием автора, а во втором – остальные публикации (97 штук), ссылки на которые приведены в тексте диссертации.

Во введении приведено обоснование актуальности выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, описана методология исследования,

сформулированы выносимые на защиту положения, обоснована степень их достоверности и представлены способы апробации.

В первой главе, состоящей из четырех разделов, дано краткое описание основных свойств МКВМ, доступных для измерений, и приведена статистика МКВМ за последние два цикла солнечной активности. Отмечается важность такой характеристики МКВМ как ионный состав плазмы для их отождествления и исследования. Дано описание метода определения солнечных источников МКВМ посредством анализа оптических наблюдений с помощью космических аппаратов STEREO, SDO и SOHO, совмещенного с использованием эмпирических и магнитогидродинамических (МГД) моделей распространения солнечного ветра во внутренней гелиосфере. Рассмотрены основы широко применяемого метода спектроскопической диагностики плазмы в атмосфере Солнца с помощью анализа температурного распределения дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ) по многоканальным наблюдениям в диапазоне вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения. Эффективность применения метода ДЭМ-анализа продемонстрирована на примере мощного эруптивного события 10 сентября 2017 г. Показан эффект “выметания” корональной плазмы из области пространства над вспышкой в результате КВМ. Стоит отметить, что ДЭМ-анализ солнечной плазмы сопряжен с большим количеством технических трудностей. В частности, для его реализации требуется качественная предварительная подготовка данных многоканальных наблюдений. В главе 1 автор диссертации демонстрирует навыки эффективной работы с соответствующими данными и хорошее владение методикой ДЭМ-анализа (автор использует одну из широко распространенных и апробированных реализаций). Описанные в этой главе методы применяются для исследования МКВМ в главе 2.

Глава 2, состоящая из четырех разделов, посвящена исследованию нескольких МКВМ, наблюдавшихся в 2011 г. Основное внимание уделено расчету ионного состава плазмы источников МКВМ в короне и сравнению с экспериментальными данными, полученными космическими аппаратами in

situ в межпланетном пространстве. Такое сравнение позволяет проверить адекватность выполненных расчетов. В свою очередь, это дает обоснование использованию расчетов для исследования процессов формирования и распространения МКВМ. В разделе 2.1 приведены основные параметры МКВМ, в частности характерные зарядовые составы, и дано описание методики их расчета на основе баланса ионизации и рекомбинации ионов при изменении температуры и плотности плазмы в результате движения выброса в короне. Для определения параметров плазмы КВМ и расчета средних зарядов различных ионов (в частности, железа) до момента “замораживания” высоко в короне использовались два метода: 1) на основе численного МГД-моделирования, 2) с помощью ДЭМ-анализа с использованием данных многоканальных наблюдений в ВУФ диапазоне. Эти методы применены в разделах 2.2 и 2.3, соответственно, для исследования источников МКВМ в двух событиях. В разделе 2.2 подробно изучено формирование КВМ 2 августа 2011 г. Для определения конфигурации магнитного поля в родительской области КВМ перед началом эрупции применялась экстраполяция в нелинейном бессиловом приближении (NLFF) с использованием фотосферных векторных магнитограмм прибора HMI/SDO. Результаты экстраполяции итеративно корректировались посредством сопоставления с ВУФ наблюдениями и использовались в качестве начальных данных для 3D МГД-моделирования, в результате которого были получены значения плотности и температуры плазмы внутри КВМ. Эти параметры использовались для расчета зарядового состояния ионов железа внутри КВМ в области “замораживания”. В разделе 2.3 второй метод на основе ДЭМ-анализа использован для определения температуры и концентрации плазмы внутри КВМ 24 февраля 2011 г. Для обоих подходов было показано удовлетворительное (в пределах погрешностей измерений) согласие между рассчитанными и измеренными in situ зарядовыми составами ионов, что демонстрирует применимость этих подходов для исследования источников МКВМ. На основе выполненных расчетов сделан важный вывод (не

вошедший в защищаемые положения) о том, что параллельно с охлаждением плазмы КВМ за счет расширения должен присутствовать и нагрев. Вопрос нагрева плазмы КВМ открыт и разработанный метод в дальнейшем может быть использован для поиска ответа.

Глава 3, состоящая из пяти разделов, посвящена анализу экспериментальных данных с целью выявления различных типов взаимодействия МКВМ друг с другом и с высокоскоростными потоками солнечного ветра и оценки их геоэффективности. В разделе 3.1 показано влияние высокоскоростного потока из корональной дыры на ионный состав МКВМ, причем результат зависит от структуры магнитных полей и расстояния между родительским КВМ и ближайшей корональной дырой. Предложена интересная интерпретация наблюдаемого эффекта понижения заряда ионов плазмы КВМ как результата пересоединения магнитного поля КВМ и корональной дыры, сопровождаемого понижением температуры плазмы КВМ. Стоит отметить, что этот процесс также может иметь отношение и к проблеме переноса солнечных космических лучей и их выхода из короны. В разделе 3.2 исследовано 23 события МКВМ в 2010-2011 гг. и на основе анализа ионного состава показано, что события МКВМ могут быть разделены на одиночные и комплексные по количеству источников на Солнце. Также предложена классификация комплексных (или множественных) МКВМ. Продемонстрировано, что комплексные МКВМ структуры имеют большую длительность по сравнению с единичными МКВМ. В разделе 3.3 получен результат о том, что комплексные структуры со значительно большей вероятностью приводят к умеренным или сильным геомагнитным бурям чем единичные МКВМ (67% против 17%), а в разделе 3.4 показано, что комплексные структуры, особенно в случае сильного взаимодействия образующих их МКВМ, чаще вызывают более сильные Форбуш-понижения потоков космических лучей.

Новизна работы и полученных результатов заключается в следующем. Во-первых, разработан новый оригинальный метод идентификации и

исследования солнечных источников МКВМ на основе анализа их ионного состава. Во-вторых, предложена новая классификация структур МКВМ, также основанная на характеристиках ионного состава. Впервые показано, что различные структуры МКВМ, определенные согласно этой классификации, имеют различную геоэффективность и по-разному влияют на потоки космических лучей в межпланетном пространстве. В будущем полученные результаты будут учитываться при построении прогнозов космической погоды. Результаты могут быть востребованы в таких профильных организациях РФ как НИИЯФ МГУ, ИКИ РАН, ИЗМИРАН, ИСЗФ СО РАН, ГАО РАН, ИПГ.

Высокая степень достоверности полученных результатов основана на следующих факторах: 1) использовании высококачественных экспериментальных данных хорошо известных космических миссий (SOHO, STEREO, SDO, ACE, Wind), а также методов и программного обеспечения их обработки, используемых международным сообществом исследователей на протяжении многих лет, 2) использовании проверенных современных физических подходов, в частности 3D МГД моделирования и спектроскопии ВУФ излучения, 3) хорошем согласии результатов моделирования и расчетов с экспериментальными данными, 4) непротиворечии результатов здравому смыслу, а также результатам современных исследований в области физики Солнца и солнечно-земных связей, 5) результаты опубликованы в авторитетных профильных рецензируемых журналах, а также докладывались и обсуждались на многих тематических научных конференциях и семинарах.

У меня имеется лишь несколько небольших замечаний по представленной работе, связанных либо с обнаруженными неточностями, либо с недостаточно подробными пояснениями написанного:

1) В главе 2 недостаточно четко объяснен выбор событий для детального исследования ионного состава КВМ/МКВМ (24 февраля и 2 августа 2011). Стоило бы пояснить, по какой причине выбраны именно эти события, а не какие-то другие.

2) В главе 2 (стр. 44-46) не разъяснено, каким конкретно образом проводилась коррекция расчетов поля в нелинейном бессиловом приближении (NLFF) при сравнении с данными наблюдений в ВУФ каналах. Это нетривиальная задача и про нее стоило бы написать подробнее.

3) Стоило бы более подробно написать про необходимость дополнительного нагрева плазмы КВМ, признаки которого обнаружены в главе 2. В частности, на стр. 53 упомянуто про необходимость введения дополнительного нагрева на расстояниях $0.25-1.5R_s$ и $1.5-5R_s$ в событии 2 августа 2011 г., однако функция нагрева не указана и непонятно, как учитывался этот нагрев. В выводах к главе 2 (на стр. 62) тезисно отмечена возможность двух стадий нагрева протуберанца в событии 24 февраля 2011 г.: 1) токовый (предэруптивный) и 2) нагрев ускоренными электронами от вспышки (после начала эрупции). При этом, ранее в тексте эти возможности не обсуждались (в выполненных МГД расчетах не учитываются ускоренные частицы) и не приведены ссылки на работы, где эти механизмы рассматривались.

4) В главе 2 в расчетах ионного состава КВМ не учитывается влияние излучения вспышки. Однако в главе 1 (стр. 29-31) отмечена возможность вклада резонансного излучения вспышки на определяемый с помощью ДЭМ-анализа температурный состав плазмы в короне над вспышечной областью. Для внутренней части КВМ эффект может быть более сильным, так как там повышенная плотность плазмы. Имело бы смысл оценить и обсудить возможное влияние излучения вспышки на рассчитываемый ионный состав КВМ/МКВМ в исследованных событиях.

5) Указанные в тексте на стр. 52 (последний абзац) изменения параметров плазмы для события КВМ 2 августа 2011 г. не соответствуют кривым, представленным на рис. 18 (стр. 53).

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени

М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.03.03 – «Физика Солнца» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Родькин Денис Геннадьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – «Физика Солнца».

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Отдела физики космической плазмы
ФГБУН «Институт космических исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН)»



ЗИМОВЕЦ Иван Викторович
« 9 » декабря 2020 г.

Контактные данные:

тел.: , e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.03.03 – «Физика Солнца»

Адрес места работы:

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32,

ФГБУН «Институт космических исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН)», Отдел физики космической плазмы

Тел.: ; e-mail:

Подпись сотрудника ИКИ РАН И.В. Зимовца удостоверяю:

Ученый секретарь ИКИ РАН

кандидат физико-математических наук



А.М. Садовский
« 9 » декабря 2020 г.