

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Капорцева Ксения Борисовна

**Моделирование прихода солнечных корональных выбросов
массы к Земле и оценка их геоэффективности**

Специальность: 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2025

Работа выполнена на кафедре физики космоса Физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: **Калегаев Владимир Владимирович,**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Абунина Мария Александровна,**
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экспериментальных методов исследования вариаций космических лучей Института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкина Российской академии наук
Григоренко Елена Евгеньевна,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник отдела физики космической плазмы Института космических исследований Российской академии наук
Демехов Андрей Геннадьевич,
доктор физико-математических наук,
доцент, главный научный сотрудник лаборатории магнитосферно-ионосферных связей Полярного геофизического института

Защита состоится 23 октября 2025 года в 10 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, 13, конференц-зал.
e-mail: dissovet@sai.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский п-кт, д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3517>
Автореферат разослан « 22 » сентября 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.013.1,
доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

Общая характеристика работы

Актуальность и разработанность темы исследования

Корональные выбросы массы (КВМ) – взрывные процессы на Солнце, яркие проявления солнечной активности, регистрируемые, как правило, при наблюдениях солнечных излучений в широком диапазоне частот. КВМ, распространяющиеся в межпланетной среде, получили названия межпланетные КВМ (МКВМ). Они обычно регистрируются в ходе прямых измерений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Изучение природы формирования КВМ и распространения МКВМ проливает свет на механизмы солнечно-земных связей, и поэтому эти исследования имеют фундаментальное значение для физики гелиосферы и магнитосферы. Актуальность этих исследований связана с тем, что КВМ/МКВМ являются важным элементом, реализующим передачу массы-энергии-импульса из солнечного ветра в магнитосферу Земли.

Основной структурой КВМ является магнитный жгут, который на изображениях коронографов виден как более яркая область, распространяющаяся от Солнца, имеющая четкую границу на переднем фронте. Соответствующая магнитному жгуту область МКВМ получила название магнитного облака из-за повышенных значений магнитного поля, которые регистрируются в измерениях *in situ*. На изображениях коронографа, перед магнитным жгутом нередко наблюдается менее яркая, быстро расширяющаяся область, соответствующая области сжатия «sheath», передний край которой соответствует ударной волне [Temmer и др., 2023].

При прямых измерениях плазмы в межпланетном пространстве вблизи оси распространения МКВМ, могут быть зарегистрированы все описанные выше характерные области – ударная волна, область сжатия, магнитное облако. Однако, если на спутнике регистрируется только фланговая часть МКВМ, эти структуры могут быть менее ярко выражены, а некоторые, даже отсутствовать. В теле МКВМ в этом случае могут не наблюдаться характерные для магнитного жгута особенности: увеличенная величина магнитного поля и вращение вектора магнитного поля. Такая структура в теле МКВМ называется “ejecta” [Jian и др., 2006]. Необычная структура МКВМ, либо отсутствие каких-либо характерных областей, могут регистрироваться и в случае слабых выбросов или взаимодействующих потоков, когда более мощный поток солнечного ветра может сильно сжать, отклонить или изменить структуру медленного и менее массивного выброса.

МКВМ вызывают наиболее сильные геомагнитные возмущения и, поэтому, являются ключевым элементом космической погоды. По данным [Yermolaev и др., 2012] порядка 60% магнитных бурь связаны именно с приходом МКВМ. В магнитосфере происходит генерация электрических токов, формирование магнитосферных токовых систем, ускорение и рассеяние заряженных частиц, развитие волновой активности [Demekhov и др., 2020; Grigorenko и др., 2024; Kalegaev, Vlasova, 2014; Zelenyi и др., 2018]. Распространение МКВМ и их

воздействие на магнитосферу Земли необходимо прогнозировать для обеспечения безопасности космических полетов, предупреждения нарушений радиосвязи и навигации. Кроме того, сильные магнитные возмущения могут вызывать нарушения в работе наземной инфраструктуры, например, геоиндуцированные токи в трубопроводах, ЛЭП и ж/д магистралях. Магнитные поля МКВМ оказывают влияние на потоки галактических космических лучей, поэтому приход МКВМ к Земле также сопровождается Форбуш-понижениями, что описано, например в недавних работах [Abunina и др., 2025; Rodkin, Slemzin, Shugay, 2020; Shlyk и др., 2022]. Потоки солнечных протонов также испытывают модуляцию межпланетным магнитным полем и ударными волнами в солнечном ветре [Tulupov и др., 2012], в том числе переносимыми МКВМ [Guo и др., 2018; Palmerio и др., 2022]. Таким образом, комплексность влияния МКВМ как на основные аспекты космической погоды, так и на потоки энергичных частиц в межпланетном пространстве, обуславливают важность изучения вопросов формирования КВМ и механизмов их распространения в гелиосфере и разработки моделей для прогноза их прихода на орбиту Земли.

Прогнозирование параметров корональных выбросов массы (КВМ) активно исследуется в научном сообществе. Наиболее полный обзор моделей и методов представлен в работах [Riley и др., 2018; Vourlidas, Patsourakos, Savani, 2019; Zhao, Dryer, 2014]. Одной из ключевых платформ является CME Scoreboard (NASA/CCMC), где различные научные группы публикуют прогнозы времени прибытия КВМ. Анализ более чем 30 моделей показал, что средняя ошибка прогноза составляет 13–17 часов, при максимальных отклонениях до ± 70 часов [Riley и др., 2018].

Наиболее широко применяемая в оперативных прогнозах модель — WSA–ENLIL+Cone [Taktakishvili и др., 2009], в которой учитывается структура фонового солнечного ветра, распространение КВМ и его геометрия. Однако её использование ограничено необходимостью ручной обработки изображений коронографа [Mays и др., 2015; Millward и др., 2013], что затрудняет реализацию автономной работы в реальном времени. Развитие получили и более продвинутые МГД-модели, такие как EUHFORIA [Pomoell, Poedts, 2018], SUSANOO [Shiota, Kataoka, 2016], позволяющие учитывать сложные процессы в гелиосфере.

Среди простых численных моделей выделяется DBM [Vršnak и др., 2013] основанная на аэродинамическом сопротивлении. Она доступна для использования онлайн и широко применяется, в том числе в виде модификаций, например, ELEvoHI [Amerstorfer и др., 2021; Rollett и др., 2016], использующей изображения STEREO.

В последние годы активно развиваются методы на основе машинного обучения. Например, алгоритм CAT-PUMA [Liu и др., 2018] и модель Y. Wang et al. [Wang и др., 2019] используют данные КВМ и параметры солнечного ветра для прогноза времени прибытия. Хотя нейросетевые подходы демонстрируют

перспективные результаты, они пока не позволяют однозначно определить факт прибытия КВМ на Землю. Существуют также попытки прогнозировать сами события КВМ по данным с SDO/HMI [Liu и др., 2020], что открывает новые направления. Для прогнозирования прихода КВМ разрабатываются также статистические подходы, например модель ИЗМИРАН [Shlyk и др., 2022], позволяющая получать время и скорость прихода КВМ к Земле на основе его начальной скорости, гелиодолготы источника и скорости фонового солнечного ветра.

Дополнительные подходы включают использование волонтерских проектов (Solar Stormwatch) и методы коррекции параметров КВМ по мультиспутниковым наблюдениям [Temmer, Preiss, Veronig, 2009; Verbeke и др., 2023]. Также активно исследуется влияние неопределённости входных данных, в том числе через методы ансамблевого прогнозирования [Amerstorfer и др., 2021; Dumbović и др., 2018; Mays и др., 2015].

Одной из актуальных проблем прогнозирования является определение параметров КВМ на ранней стадии их прогнозирования. Для этого можно использовать наблюдения коронографа, а также комбинировать их с наблюдениями солнечного диска, что позволяет определять координаты источника КВМ по соответствующей вспышке, активной области, эруптивному волокну. Одними из проявлений КВМ являются корональные димминги – резкие локальные снижения плотности вещества в солнечной атмосфере, сопровождающие процесс формирования КВМ. Эти области (димминги) проявляются как участки пониженной яркости (потемнения) в линии 21,1 нм, регистрируемой инструментом AIA на борту спутника SDO. Димминги хорошо детектируются по разностным изображениям, а их параметры могут быть полезны в уточнении начальных параметров КВМ

Для валидации моделей авторы используют различные наборы МКВМ, достоверно зарегистрированных на орбите Земли или в межпланетном пространстве. Каталоги МКВМ зачастую используют различные критерии для выделения событий. По этой причине общее количество событий за один и тот же период времени может отличаться, как и временные характеристики или иная информация по отдельным событиям. Для решения задач моделирования КВМ часто используется метод объединения информации о приходе МКВМ из нескольких источников, для создания более полной базы регистраций МКВМ у Земли, которую можно использовать для валидации и тренировки моделей. Одни из наиболее известных каталогов МКВМ, зарегистрированных у орбиты Земли, которые будут использоваться в работе в дальнейшем, это: каталог Ричардсона и Кейн [Cane, Richardson, 2003] (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.html>), данные из БД CCMC CME Scoreboard, и данные о регистрации МКВМ из Каталога

крупномасштабных событий солнечного ветра ИКИ РАН (<http://www.iki.rssi.ru/omni/catalog/> , [Yermolaev и др., 2009]).

Таким образом, несмотря на разнообразие подходов, проблема точного и оперативного прогнозирования параметров КВМ остаётся открытой. Современные исследования сосредоточены на повышении точности, автоматизации обработки данных и адаптации моделей к реальному времени.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы является разработка модели прихода корональных выбросов массы, позволяющей выполнить прогноз скорости и времени их прибытия на орбиту Земли на основе данных солнечных наблюдений.

Для достижения этих целей решены следующие задачи:

1. Разработка методов моделирования распространения КВМ в гелиосфере с учетом их взаимодействия с фоновым солнечным ветром, позволяющей прогнозировать скорость и время прибытия КВМ к орбите Земли с использованием данных солнечных наблюдений в режиме реального времени.
2. Создание объединенного каталога наблюдаемых событий МКВМ за период 2010-2022 годов для оценки качества прогноза скорости и времени прихода корональных выбросов масс.
3. Разработка методов отбора потенциально геоэффективных событий в солнечной короне и определения значений входных параметров для модели прихода КВМ на основе данных непрерывных наблюдений КВМ и корональных диммингов.
4. Оценка точности прогнозов модели прихода КВМ на исторических данных для событий 24 цикла солнечной активности и анализ работы системы на разных фазах солнечного цикла и для событий с различным уровнем геоэффективности.
5. Разработка методов для определения скорости солнечного ветра на 1 а.е. с использованием модели прихода КВМ и модели [Shugay и др., 2011] распространения квазистационарных потоков солнечного ветра.

Методология исследования

Для решения поставленных в работе задач использовались методы теоретического и прикладного анализа, сопоставления и обобщения данных. Исследование включало обработку и интерпретацию данных из открытых баз космофизических наблюдений и каталогов событий. Были применены методы численного моделирования для воспроизведения распространения корональных выбросов массы. Вычисления и визуализация результатов выполнялись с использованием языка программирования Python и специализированных научных библиотек.

Научная новизна

В работе предложен новый алгоритм, объединяющий существующие численные и эмпирические методы моделирования прихода КВМ на 1а.е. с учетом изменений характеристик КВМ при его распространении в потоке переменного фонового солнечного ветра. Кинематика распространения самого выброса рассчитывается с помощью Drag based model [Žic, Vršnak, Temmer, 2015], а скорость переменного фонового солнечного ветра рассчитывается по модели прогноза квазистационарных потоков солнечного ветра (КСВ) [Shugay и др., 2011]. Такой подход учитывает взаимодействие КВМ и высокоскоростных потоков из корональных дыр в гелиосфере, что позволяет выполнять прогнозирование событий прихода КВМ в режиме реального времени без использования МГД моделирования.

Создан новый, максимально-полный каталог МКВМ за период 2010–2022 годов, сформированный с помощью алгоритма поиска и автоматического объединения совпадающих событий из различных существующих каталогов, и предназначенный для верификации методики прогнозирования прихода КВМ к Земле.

В работе впервые сформулирован алгоритм отбора потенциально геоэффективных КВМ, основанный на данных наблюдений короны и хромосферы Солнца. Алгоритм устанавливает соответствие между КВМ и его корональными проявлениями (диммингами), что позволяет дополнить информацию о выбросе данными о локализации его источника на солнечном диске, и, как следствие, уточнить направление его распространения.

Разработаны новые методы автоматизированной обработки исторических данных событий МКВМ, позволяющие осуществить тестирование системы моделирования распространения КВМ в гелиосфере и модели их прихода на орбиту Земли.

В работе предложена новая методика объединения результатов моделирования прихода КВМ и прогнозов скорости квазистационарных потоков солнечного ветра (модель КСВ [Shugay и др., 2011]). для получения скорректированного прогноза скорости солнечного ветра с учетом распространяющихся по нему КВМ.

Научная и практическая значимость

Солнечные корональные выбросы массы (КВМ) вызывают наиболее сильные геомагнитные возмущения и являются важным агентом, реализующим передачу массы-энергии-импульса от Солнца через межпланетную среду, заполненную потоками солнечного ветра с вмороженным межпланетным магнитным полем, в магнитосферу Земли. Изучение механизмов распространения КВМ проливает свет на механизмы солнечно-земных связей, и, поэтому, эти исследования имеют важное фундаментальное значение для физики гелиосферы и магнитосферы. Научная значимость исследований обусловлена созданием методов, которые позволяют определить корональные источники и направление распространения КВМ на ранних стадиях их развития.

Разработанные методы и подходы могут использоваться, как для теоретических исследований распространения КВМ в гелиосфере, так и для прогнозирования прихода КВМ в реальном времени.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенной методики прогнозирования прихода КВМ на околоземную орбиту в системах космической погоды с использованием данных солнечных наблюдений. Система автоматизированного определения скорости и времени прихода КВМ к Земле, включает в себя, как отбор потенциально геоэффективных событий, так и моделирование их распространения в гелиосфере с возможностью учета переменных фоновых потоков солнечного ветра. Использование предложенных в диссертации методов определения входных параметров модели, опирающихся на наблюдения хромосферы и короны Солнца, создают предпосылки для создания системы онлайн прогноза прихода КВМ и прогнозирования их воздействия на магнитосферу Земли.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование данных о скоростях корональных выбросов массы из каталога CACTus, определённых по наблюдениям коронографа LASCO, обеспечивает наилучшее согласие расчётного времени прихода корональных выбросов массы с наблюдениями в сравнении с использованием данных каталога SEEDS в рамках используемого подхода. Средняя ошибка прихода корональных выбросов массы по 25 событиям 2010–2011 годов из базы данных CACTus равна 9.24 часа при моделировании с учетом взаимодействия с фоновым солнечным ветром.
2. Сопоставление корональных выбросов массы с локальными потемнениями солнечной короны наблюдаемыми в УФ-диапазоне на фоне солнечного диска (диммингами), позволяет уточнить пространственные и угловые параметры корональных выбросов массы и выделить среди них залимбовые и потенциально геоэффективные корональные выбросы массы.

3. В 24 цикле солнечной активности до 29% корональных выбросов массы, зарегистрированных коронографом LASCO, могут быть сопоставлены с диммингами по времени и пространственным признакам; отбор по этим критериям выделяет порядка 5% событий как потенциально геоэффективные, при этом около половины из них подтверждаются наблюдениями межпланетных корональных выбросов массы в околоземном пространстве.
4. В 24 цикле солнечной активности предложенная методика прогноза прихода корональных выбросов масс (DBM с учётом переменного фонового ветра и алгоритма отбора событий) позволяет предсказать 51% всех наблюдаемых межпланетных корональных выбросов массы с ошибкой менее 48 часов, при этом среди 76 событий, ассоциированных с геомагнитными возмущениями с падением Dst более чем на 50 нТл, доля таких событий составляет 70%.
5. Объединение событий межпланетных корональных выбросов массы из различных существующих каталогов позволяет существенно расширить объем статистической базы для верификации методики прогнозирования прихода корональных выбросов массы к Земле. Межпланетные корональные выбросы массы, встречающиеся в трех исходных каталогах, обладают наибольшей геоэффективностью, скоростью распространения и продолжительностью.
6. Учет прихода корональных выбросов массы по предложенной методике (DBM с учётом переменного фонового ветра и алгоритма отбора событий), интегрированный в прогноз скорости солнечного ветра по модели распространения квазистационарных потоков солнечного ветра, позволяет уменьшить среднеквадратичное отклонение между измеренными и спрогнозированными профилями скорости солнечного ветра с 91 до 86 км/с, и увеличить коэффициент корреляции с 0.55 до 0.6 для данных 2010 года.
7. 67% от исследуемых корональных выбросов массы на фазе роста 24 цикла солнечной активности имеют скорость ниже средней скорости солнечного ветра, дают вклад в медленную составляющую солнечного ветра у орбиты Земли и оказывают незначительное влияние на геомагнитную обстановку.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием проверенных моделей, достоверных данных и общепринятых методик анализа. В исследовании применялась модель DBM, широко используемая в задачах прогнозирования распространения KBM и апробированная в ряде независимых исследований. Входные параметры определялись на основе данных из открытых международных космофизических баз (основанных на КА SOHO, КА SDO),

обеспечивающих высокую точность и надежность наблюдений. Используемые методы основаны на физических закономерностях распространения КВМ и согласуются с теоретическими представлениями и наблюдениями.

Результаты моделирования верифицировались путем сопоставления с фактическими событиями, перечисленными в общеизвестных и широко используемых каталогах МКВМ опубликованных в рецензируемых изданиях, и сравнивались с результатами других моделей, таких как WSA–ENLIL+Cone и DBEM, также опубликованными и апробированными в рецензируемых источниках. Для количественной оценки точности прогнозов применялась метрика средней абсолютной ошибки (MAE), используемая в международной практике при оценке качества прогнозов времени прибытия КВМ. Совокупность этих факторов подтверждает достоверность полученных результатов.

Личный вклад

Основной вклад Капорцевой К.Б. заключается в подготовке входных данных для моделирования, выполнении расчетов параметров прихода КВМ к Земле, а также в анализе и интерпретации результатов моделирования.

В работе (Shugay, Y.S., Kaportseva, K.B. 2021, личный вклад 40%.) Капорцева К.Б. составила список КВМ для моделирования на основе данных коронографа LASCO (каталог CACTus) и диммингов из базы Solar Demon. Было выполнено сопоставление событий, сформирован список КВМ для моделирования и произведен расчет времени и скорости их прихода к Земле с учетом длительности событий.

В работе (Kaportseva, K.B., Shugay, Y.S. 2021, личный вклад 70%) Капорцева К.Б. подготовила список межпланетных КВМ (МКВМ) для моделирования на основе каталогов Ричардсона и Кейна, а также GMU CME List. Эти данные были дополнены информацией о соответствующих КВМ из баз CACTus и SEEDS. Для трех наборов входных данных было проведено моделирование, рассчитаны ошибки, выполнен анализ полученных результатов и сделаны выводы. Кроме того, Капорцева К.Б. провела сопоставление полученных данных с результатами других моделей за те же периоды.

В работе (Shugay et al., 2022, личный вклад 40%) Капорцева К.Б. предложила первую версию алгоритма отбора событий и проанализировала его применение для 2015, 2016 и 2017 годов. На основе нескольких существующих баз данных был составлен объединённый список МКВМ для валидации модели. Проведено моделирование по DBM-модели с использованием модельной фоновой скорости солнечного ветра и пересчетом начальных параметров в нескольких точках гелиосферы. На основе объединенного списка МКВМ были рассчитаны ошибки моделирования по годам и для групп событий, разделенных по уровням геоэффективности, а также сделаны соответствующие выводы. Результаты были сопоставлены с данными других моделей.

В работе (Kaportseva et al., 2024, личный вклад 80%) Капорцева К.Б. сформулировала окончательную версию алгоритма отбора событий и алгоритм объединения каталогов МКВМ, на основании которых был получен интегрированный каталог МКВМ. Проведен анализ результатов отбора и моделирования, а также сделаны выводы о работе системы за период 2010–2018 годов. Также было выполнено сравнение с результатами модели WSA–Enlil+Cone.

В работе (Ширяев А.О., Капорцева К.Б., 2023, личный вклад 50%) Капорцевой К.Б. предложена идея и алгоритм объединения каталогов, реализован прототип программы, проведен анализ полученных результатов.

В работе (Kalegaev et al., 2023, личный вклад 10%) Капорцевой К.Б. было проанализировано состояния околоземного межпланетного пространства на предмет влияния МКВМ на квазистационарные потоки солнечного ветра у Земли.

Апробация

Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях, из них в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ «eLibrary Science Index», международными базами данных (Web of Science, Scopus, RSCI) и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Результаты диссертации докладывались на 11 конференциях:

1. Использование DBM-модели для онлайн прогноза. Капорцева К.Б. Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2019», 11 апреля 2019
2. Прогнозирование корональных выбросов массы за период 2010-2012 гг. Капорцева К.Б., Шугай Ю.С. Пятнадцатая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе", Москва, ИКИ РАН, 10-14 февраля 2020
3. Прогнозирование корональных выбросов массы с помощью DBM-модели и модели прогноза высокоскоростных потоков солнечного ветра. Капорцева К.Б., Шугай Ю.С., Еремеев В.Е., Калегает В.В. Шестнадцатая ежегодная конференция “Физика плазмы в солнечной системе”, Москва, ИКИ РАН, 8-12 февраля 2021
4. Результаты прогноза времени и скорости прихода КВМ к земле в 2014-2016 годах и анализ характеристик геоэффективных событий. Капорцева К.Б., Еремеев В.Е., Шугай Ю.С., Калегает В.В. Семнадцатая ежегодная конференция “Физика плазмы в солнечной системе”, Москва, ИКИ РАН, 7-11 февраля 2022

5. SMDC CME online forecast system: testing on the 24th cycle data and the first results. Kaportseva K., Ereemeev V., Shugay Yu., Kalegaev V. 44th COSPAR Scientific Assembly 2022, Athens, Греция, 16-24 июля 2022
6. Особенности прогноза экстремальной геоэффективности корональных выбросов массы в 2014-2017 годах. Капорцева К.Б., Шугай Ю.С., Еремеев В.Е., Калегает В.В. Ломоносовские чтения - 2022, МГУ, Россия, 18-20 апреля 2022
7. Перспективы использования корональных диммингов для прогноза прихода корональных выбросов масс к Земле. Капорцева К.Б., Вахрушева А.А., Шугай Ю.С., Калегает В.В., Еремеев В.Е., Ширяев А.О. симпозиум "Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и событий" ("ПРОГНОЗ-2023"), Троицк, ИЗМИРАН, Россия, 29-31 мая 2023
8. Прогнозирование геоэффективных КВМ в 24 цикле солнечной активности. Капорцева К.Б., Шугай Ю.С., Вахрушева А.А., Еремеев В.Е., Калегает В.В. Восемнадцатая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе", Москва, ИКИ РАН 6-10 февраля 2023
9. Отбор геоэффективных событий для системы прогноза прихода корональных выбросов масс к Земле в режиме реального времени. Капорцева К.Б., Шугай Ю.С., Вахрушева А.А., Ширяев А.О., Еремеев В.Е., Калегает В.В. Девятнадцатая ежегодная конференция "Физика плазмы в Солнечной системе", Москва, ИКИ РАН, 5-9 февраля 2024
10. Прогнозирование распространения быстрых и медленных корональных выбросов масс с помощью Drag Based Model. Капорцева К.Б., Шугай Ю.С., Вахрушева А.А., Калегает В.В., Еремеев В.Е., Ширяев А.О. симпозиум "Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и событий" ("ПРОГНОЗ-2024"), Москва, Троицк, ИЗМИРАН 27–31 мая 2024
11. The SMDC CME Forecasting System: An Analysis of the Geoeffective Event Selection Algorithm Kaportseva K., Shugay Yu, Vakhrusheva A., Shiryayev A., Ereemeev V., Kalegaev V. COSPAR 2024 scientific assembly, Пусан, Корея, Республика, 13-21 июля 2024

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 101 наименование. Общий объем текста — 126 страниц. Работа содержит 20 рисунков.

Содержание работы

Во введении

обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется основная цель работы, задачи и новизна.

В первой главе

диссертации представлен обзор современного состояния исследований по теме диссертации, описаны основные проблемы моделирования распространения корональных выбросов массы.

Здесь также приведено описание используемых моделей. DBM (Drag-based model) – одна из эмпирических моделей для прогнозирования распространения КВМ в гелиосфере. Модель подробно описана и проанализирована в работах [Dumbović и др., 2021; Vršnak, 2006; Vršnak и др., 2013; Žic, Vršnak, Temmer, 2015]. Основное предположение модели заключается в том, что, начиная с некоторого расстояния от Солнца, на выброс будет действовать только сила аэродинамического трения с потоком окружающего солнечного ветра, а характер движения будет определять разность скоростей фонового ветра и выброса. Выброс движется прямолинейно в однородной среде. Основные положения DBM описаны в уравнениях (1-6). Ускорение в DBM описывается формулой 1, где γ – параметр ускорения (гамма), v – скорость выброса в некоторый момент времени, w – скорость фонового солнечного ветра. Параметр гамма выбирается эмпирически. В работе [Cargill, 2004] автор показал, что гамма может быть выражен формулой 2, где c_d – безразмерный коэффициент, характеризующий величину замедления, A – поперечная площадь выброса, ρ_{sw} – плотность фонового солнечного ветра, M – масса выброса, M_v – виртуальная масса, эквивалентная половине массы фонового солнечного ветра в объеме равном объему выброса V : $2M_v = \rho_w V$. Таким образом, считая, что $V = A\rho$, где ρ – плотность выброса, приходим к формуле 3. Согласно [Dumbović и др., 2021; Vršnak и др., 2013] он может принимать значения $(0,1 - 2) \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}$.

Закон движения КВМ выражается уравнением 4. В приближении постоянства параметра гамма и скорости фонового ветра во времени зависимости расстояния, пройденного КВМ, и его скорости от времени можно получить аналитически. Эти зависимости представлены формулами 5 и 6.

$$a = \gamma(v - w)|v - w|, \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{c_d A \rho_{sw}}{M + M_v}, \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{c_d A \rho_{sw}}{V \left(\rho + \frac{\rho_w}{2} \right)} = \frac{c_d}{L \left(\frac{\rho}{\rho_w} + \frac{1}{2} \right)}, \quad (3)$$

$$\frac{d^2 r}{dr^2} = -\gamma(r) \left(\frac{dr}{dt} - w(r) \right) \left| \frac{dr}{dt} - w(r) \right|, \quad (4)$$

$$v(t) = \frac{v_0 - w}{1 \pm \gamma(v_0 - w)t} + w, \quad (5)$$

$$r(t) = \pm \frac{1}{\gamma} \ln(1 \pm \gamma(v_0 - w)t) + wt + t_0. \quad (6)$$

В ряде работ проведено сравнение DBM в разных её вариациях с такими моделями как WSA-Enlil+Cone и другими и показано, что DBM даёт результаты моделирования не хуже более сложных МГД моделей [Dumbović и др., 2018; Riley и др., 2018]. В работе [Dumbović и др., 2018] показано, что DBEM показывает аналогичные результаты по сравнению с моделью WSA-Enlil+Cone. На выборке из 25 событий, из которых 16 дошли до Земли, а 9 прошли мимо, обе модели успешно предсказали все 16 событий. Средняя ошибка прогнозирования времени составила -9.7 ч. и -6.1 ч., а средняя абсолютная ошибка – 14.3 и 12.8 часов соответственно для DBEM и WSA-Enlil+Cone. Среди 9 «ложных» событий удалось определить 5 и 6 соответственно по каждой модели.

Во второй главе

описывается методика моделирования KBM с помощью DBM модели, в которую добавлена скорость переменного фонового солнечного ветра. Одним из входных параметров для DBM является скорость фонового солнечного ветра, по которому распространяется KBM. Для моделирование фоновой скорости используется модель квазистационарных потоков солнечного ветра – эмпирическая модель, связывающая площадь корональных дыр (КД) и скорость солнечного ветра в межпланетной среде [Shugay и др., 2017; Shugay и др., 2011]. Квазистационарные потоки солнечного ветра можно разделить на медленный ветер, источником которого является пояс стримеров, и высокоскоростные потоки (ВСП) из КД. Площади КД вычисляются по изображениям Солнца в ультрафиолете (19.3 нм), получаемым прибором AIA КА SDO. На изображениях выделяется геоэффективная область ($\pm 20^\circ$ по долготе и $\pm 40^\circ$ по широте), площадь КД в этой области определяются с помощью порогового алгоритма и связывается со скоростью солнечного ветра эмпирической формулой:

$$V(S_i, t) = V_{min} + A_i S_i(t_{i0})^{\alpha_i}, \quad (7)$$

где $S_i(t_{i0})$ – относительная площадь КД внутри выделяемой области в момент времени t_{i0} ; V_{min} – минимальная скорость Солнечного ветра за предыдущий оборот (слагаемый, позволяющий учесть скорость медленного солнечного ветра); A_i и α_i – подбираемые параметры; t – время прихода потока ВСП на околоземную орбиту. Коэффициенты A_i и α_i подбираются путем минимизации ошибок прогнозирования. Время распространения СВ от солнечной короны по гелиосфере до 1 а. е. рассчитывается по баллистической модели, в которой движение СВ полагается равномерным и радиальным. Результаты работы модели представлены на сайте представленным на сайте

В 4 параграфе первой главы проанализированы различные наборы входных данных и показано, что лучшие результаты прогноза достигаются при использовании данных из БД SACTus, в приближении равномерного распространения KBM от точки наблюдения в коронографе до 20 солнечных

радиусов, где начинается расчёт с помощью DBM. Для тестирования модели был выбран промежуток времени с мая 2010 по декабрь 2011 гг., так как именно с мая 2010 года начали поступать данные с обсерватории SDO, которые мы используем для прогноза скорости квазистационарных потоков солнечного ветра. В качестве моделируемых событий использовались события из каталогов MKBM Richardson&Cane [Cane, Richardson, 2003] и GMU CME List [Hess, Zhang, 2017] за указанный период времени. С учетом совпадающих событий, и без учета события в сентябре 2010, когда в данных LASCO пропуск, всего нами было проанализировано распространение 26 KBM. В ходе моделирования распространения KBM для каждого события были получены зависимости $R(t)$ и $v(t)$, и вычислено время и скорость прихода MKBM на расстояние 1 а.е. Эти значения сравнивались с параметрами MKBM из каталогов и вычислялась ошибка прогнозирования:

$$dt = T_{\text{прогноз}} - T_{\text{каталог}}, \quad (9)$$

$$dv = v_{\text{прогноз}} - v_{\text{каталог}}. \quad (10)$$

Средняя ошибка по всем событиям в случае использования базы данных SASTus равняется 9.24 часа, средняя абсолютная ошибка 18.5 часов, что сравнимо с результатами, получаемыми другими моделями.

В третьей главе

подробно описывается создание набора данных для оценки точности работы системы прогнозирования в 23 цикле солнечной активности. Для тестирования модели необходимо провести оценку прогнозирования прихода KBM на околоземную орбиту. Для реализации такой оценки спрогнозированное время прихода сравнивается с наблюдаемым временем регистрации MKBM на околоземной орбите. Однако, определение точного времени прихода MKBM по данным *in situ* зачастую представляет собой сложную задачу. Обычно исследователи используют уже существующие каталоги регистрации MKBM на орбите Земли, либо применяют экспертную оценку для каждого конкретного случая.

Предложен алгоритм объединения существующих каталогов MKBM, обоснована необходимость такого объединения, и проведен его анализ объединенного каталога MKBM (ОК MKBM) для периода 2010-2023 годы. В результате объединения получается список из 400 событий с пересечениями между разными исходными каталогами. 147 событий (37%) из ОК MKBM присутствовали как минимум в двух исходных каталогах, а 33 события были упомянуты во всех исходных каталогах. В качестве исходных каталогов рассматривались: каталог Ричардсона и Кейн [Cane, Richardson, 2003] (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.html>), данные из БД CCMC CME Scoreboard, и данные о регистрации MKBM из Каталог крупномасштабных событий солнечного ветра ИКИ РАН (<http://www.iki.rssi.ru/omni/catalog/>, [Yermolaev и др., 2009]). К данным о временных параметрах событий, полученным из исходных каталогов, для событий ОК MKBM были посчитаны значения средней и максимальной

скорости плазмы солнечного ветра по данным БД omni. Так же для каждого события было рассчитано минимальное значение Dst-индекса, зарегистрированного во время наблюдения события. Анализ показал, что события, определенные в двух и более каталогах одновременно, являются более длительными и геоэффективными. События, зарегистрированные во всех трех каталогах, имеют среднюю продолжительность 30 ч, и среднее значение минимального Dst геомагнитного возмущения -70 нТл, в то время как для всего набора событий эти значения равны соответственно 23 ч и -35 нТл.

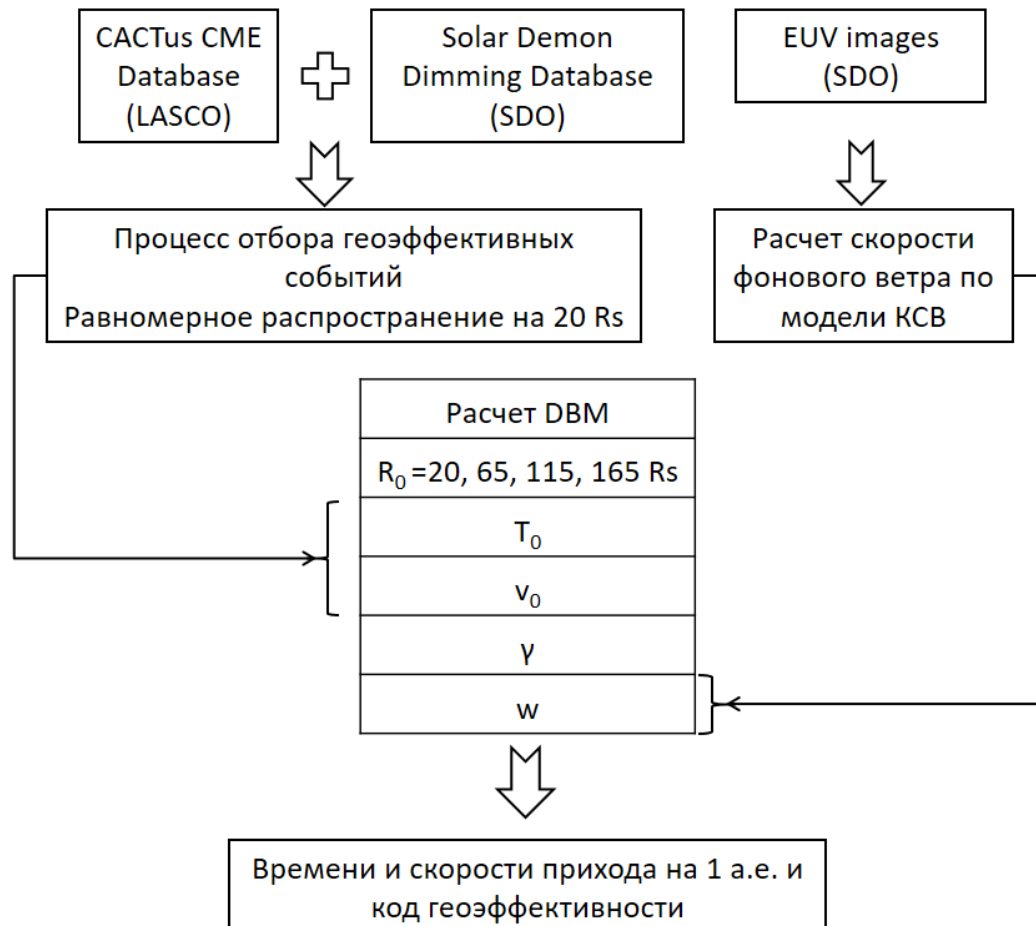


Рисунок 2. Блок-схема работы системы прогнозирования

В четвертой главе

описывается схема системы для онлайн прогнозирования времени и скорости корональных выбросов массы. Алгоритм представлен на рисунке 2. Время (T_0) и скорость (v_0) выброса на расстоянии 20 солнечных радиусов ($R_0 = 20R_s$), необходимые для расчета DBM, берутся из каталога CACTus. Скорость фотонного солнечного ветра (w) рассчитывается с помощью модели QSW. Параметр ускорения γ выбирается в зависимости от начальной скорости KBM ($0,5 \cdot 10^{-7}$ 1/км для KBM с начальными скоростями до 500 км/с; $0,1 \cdot 10^{-7}$ 1/км для KBM с начальными скоростями более 1000 км/с; и $0,2 \cdot 10^{-7}$ 1/км для остальных KBM). Параметры выброса обновляются несколько раз по мере распространения KBM по линии Солнце-Земля: на удалении в 65, 115 и 156 R_s от Солнца. Это позволяет учесть переменный фоновый солнечный ветер, например, в случае когда высокоскоростной поток догоняет более медленный KBM.

Алгоритм отбора геоэффективных событий включает в себя несколько этапов.

Этап 1. Фильтр узких событий

На первом этапе события разделяются по углу раствора конуса. Узкие события не считаются потенциально геоэффективными

Этап 2. Анализ соответствующих диммингов

Сопоставление КВМ, наблюдаемых в коронографе и диммингов, необходимо для определения координат источника выброса на солнечном диске, и отсеивании КВМ, произошедших на обратной стороне Солнца. В ряде работ было показано, что параметры диммингов коррелируют с параметрами КВМ [Chikunova и др., 2020; Chikunova и др., 2023; Dissauer и др., 2019; Harrison и др., 2003; Mason и др., 2016; Vakhrusheva и др., 2024]. Геоэффективными будут считаться события, для которых было установлено соответствие «КВМ-димминг», основанное на угловых и временных соответствиях между событиями из базы КВМ и базы диммингов.

Этап 3. Фильтр по параметрам димминга

Геометрический центр димминга (усредненный за время наблюдения), не должен выходить за границы солнечного диска, то есть: $R_{dist} < 1$. Иначе считается, что димминг произошел за лимбом, а следовательно, такое событие менее геоэффективно.

Если всем заданным условиям Этапов 2 и 3 подходит несколько диммингов, то в соответствие с КВМ попадает димминг, ближайший к нему по времени.

Далее все КВМ разделяются на подмножества: КВМ, прошедшие все проверки считаются геоэффективными. Прогноз при этом технически можно осуществить для всех событий и далее произвести сопоставление с наблюдаемыми МКВМ, чтобы проверить эффективность алгоритма.

Валидация.

Для валидации результатов было посчитано количество событий следующих множеств: которые были предсказаны и наблюдались (т.е. могли быть сопоставлены с событием из каталога МКВМ с точностью до определенного временного допуска) – “hit”; которые были предсказаны, но не наблюдались – “false alarm”, и которые наблюдались, но не были предсказаны – “miss”. Для каждого события множества “hit” были рассчитаны точность прогноза времени и скорости прихода к Земле (по формулам 9 и 10), а также среднее и среднее абсолютное значения ошибок по всему набору и стандартное отклонение.

Результаты прогнозирования

Результаты валидации получаются различными при выборе разных наборов событий МКВМ, которые считаются наблюдаемыми, и при изменении допустимой максимальной ошибки прогноза. Показано, что для набора МКВМ из ОК МКВМ, для максимальной допустимой ошибки прогноза в 48 часов из 400 МКВМ за период 2010-2018 годы успешно прогнозируется 51% событий. А для

набора событий из ОК МКВМ не включающим в себя события из каталога ИКИ РАН, для максимальной допустимой ошибки прогноза в 48 часов из 222 МКВМ за тот же успешно прогнозируется 64% событий. Отношение hit/fa равняется 1,28 при использовании ОК МКВМ для валидации и 0,67 при использовании ОК МКВМ без учета событий из базы ИКИ РАН (для максимально допустимой ошибки сопоставления 48 часов).

Использование более обширного каталога МКВМ приводит к тому, что увеличивается количество удачных прогнозов, относительно количества ложных тревог, однако количество непредсказанных событий тоже растет. Большое влияние набора МКВМ на результаты прогнозирования можно объяснить тем, что в списке ИКИ РАН имеется много МКВМ, не вызвавших существенного геомагнитного возмущения. Это подтверждается тем, что средние значения минимума индекса Dst $\langle Dst_{min} \rangle$, зарегистрированные за период регистрации телами МКВМ для ОК МКВМ и для ОК МКВМ без событий из ИКИ РАН равны соответственно -35 нТл и -45 нТл.

Чтобы проанализировать способность системы прогнозировать именно геоэффективные события, были рассчитаны значения $\langle Dst_{min} \rangle$ для всех спрогнозированных МКВМ и для не спрогнозированных, для τ , равного 48 часам. Для результатов сравнения прогноза с ОК МКВМ без событий из базы ИКИ РАН результат составляет -50 нТл и -43 нТл для спрогнозированных и не спрогнозированных МКВМ соответственно. При сравнении прогноза с событиями из ОК МКВМ значение минимального Dst , усредненного по спрогнозированным событиям, остается почти таким же (-49 нТл), тогда как $\langle Dst_{min} \rangle$ для не спрогнозированных уменьшается до -38 нТл.

Таким образом показано, что различные каталоги с одной стороны дополняют друг друга, а с другой стороны репрезентуют МКВМ с различной геоэффективностью. Система более успешно прогнозирует события вызвавшие большие геомагнитные возмущения (меньший процент miss, и большее значение отношения hit/fa). Однако среди всех успешно спрогнозированных событий (hit) большая часть связана всё же с МКВМ вызвавшими слабые геомагнитные возмущения.

Прогноз скорости

Были проанализированы также результаты прогноза скорости прихода КВМ к Земле. Средняя ошибка скорости прогноза (для сопоставления с ОК МКВМ в пределах ошибки прогноза времени 48 ч.) равняется 21.6 км/с, что говорит о тенденции к переоценке скорости. При уменьшении допустимой ошибки прогноза времени с 48 до 24 часов, средняя ошибка скорости прогноза увеличивается.

Более тщательный анализ точности прогнозирования скорости на различных наборах МКВМ выявляет более сложную тенденцию. В то время как скорость менее геоэффективных событий завышена, скорость более геоэффективных событий занижена: средние значения dv уменьшаются с 31,5 км/с до -58,1 км/с

для событий, связанных с геомагнитными возмущениями малой (падение Dst до -50 нТл) и высокой (падение Dst более -100 нТл) интенсивности соответственно.

Особенности прогнозирования на спаде солнечной активности

Рассмотрим отдельно особенности прогнозирования на спаде цикла солнечной активности. Для этого был выбран период 2015–2017 годы. В 2015 годы наблюдается ещё большое количество KBM, которое быстро снижается в 2016 и 2017 году. Результаты прогноза представлены в таблице 1.

Кол-во событий	2015	2016	2017
Отобранные KBM (Hit+FA)	82	22	14
Hit	38 (39,5%)	7 (14%)	8 (20%)
FA	44 (46%)	15 (29%)	6 (15%)
Miss	14 (14.5 %)	29 (57%)	26 (65%)

Таблица 1. Количество попаданий (hit), промахов (miss) и ложных тревог (FA), прогнозируемых системой SMDC в 2015–2017 гг. В скобках указано процентное соотношение количества попаданий (hit), промахов (miss) и ложных тревог (FA) к сумме всех трех значений (для максимально допустимой ошибки прогноза в 48ч).

Согласно таблице 1, на спаде солнечной активности количество отобранных для прогноза событий резко спадает, и как следствие спадает количество успешных прогнозов и ложных тревог. В то время как в 2015 году наблюдается превышение количества прогнозируемых событий над количеством наблюдаемых событий ($hit+fa > hit+miss$), к 2017 году ситуация меняется на противоположную.

В таблице 2 представлен анализ изменения результатов прогноза при уменьшении максимально допустимой ошибки прогноза. В этом подходе, если ошибка прогноза времени прихода KBM превышает допустимую, то такое событие не считается hit, а считается fa, при этом соответствующий ему MKBM считается не предсказанным (miss). Результаты были сопоставлены с результатами, представленными в работе [Riley и др., 2018]. В этой работе рассматриваются прогнозы прихода KBM, сделанные в реальном времени и поданные в системц CCMC CME Scoreboard различными научными группами. Авторы статьи пришли к выводу, что лучшие результаты прогноза за весь исследуемый период (2013-1018) получаются при усреднении прогнозов полученных различными моделями. Такой усредненный результат для каждого из событий получил название «Среднее по всем моделям» («Average of models» - AOM).

Год	2015			2016			2017		
τ, ч	12	24	36	12	24	36	12	24	36
SMDC, %	42	61	83	43	57	71	40	40	60
AOM, %	52	81	95	29	64	71	40	60	100

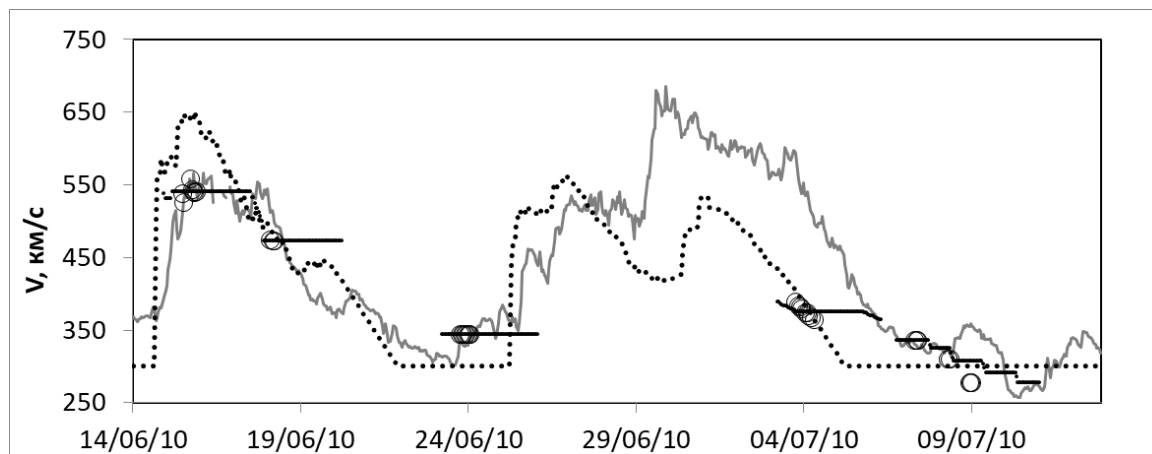
Таблица 2. Количество спрогнозированных MKBM (в % от общего числа успешных прогнозов) в доверительных интервалах τ для ошибки времени

прибытия на 2015–2017 гг., полученные системой SMDC и опубликованные CCMC CME Scoreboard «Average of models» - AOM.

В пятой главе

исследовалась возможность улучшения прогнозирования скорости солнечного ветра на 1 а.е. путем добавления к прогнозу скорости квазистационарных потоков солнечного ветра прогноз скорости KBM. В работе также использован алгоритм отбора KBM, основанный на отбросе событий по угловым параметрам, а также на сопоставлении событий KBM и событий диммингов из базы диммингов Solar Demon (<http://solar demon.oma.be/>) [Kraaikamp, Verbeeck, 2015]. Корональные димминги обычно наблюдаются, как кратковременное уменьшение интенсивности части изображения Солнца в мягком рентгеновском и ультрафиолетовом излучении, и могут быть связаны с флуктуациями плотности или температуры в солнечной короне. Димминги, зафиксированные за указанный период, сопоставлялись с событиями KBM, полученными из базы данных CACTus, по времени начала события. Так как события в базе данных Solar Demon доступны с конца мая 2010, рассматриваемый интервал времени начинается этим моментом и включает в себя остаток 2010 года, что соответствует росту активности 24-го солнечного цикла. Димминги сопоставляли с KBM из баз данных CACTus и SEEDS (LASCO) по их времени наблюдения с допуском отставания наблюдения KBM от наблюдения димминга 2 часа. После отбрасывания узких и залиम्бовых событий осталось 94 события KBM, для которых осуществлялся прогноз скорости и времени прихода соответствующих им MKBM на орбиту Земли.

Средняя скорость рассматриваемых событий составила 331 ± 188 км/с, что говорит о том, что значительная часть моделируемых потоков представляет собой медленные KBM, которые ускоряются в гелиосфере. Было получено, что из всех KBM в процессе распространения 65% ускоряются фоновым ветром, а остальные замедляются.



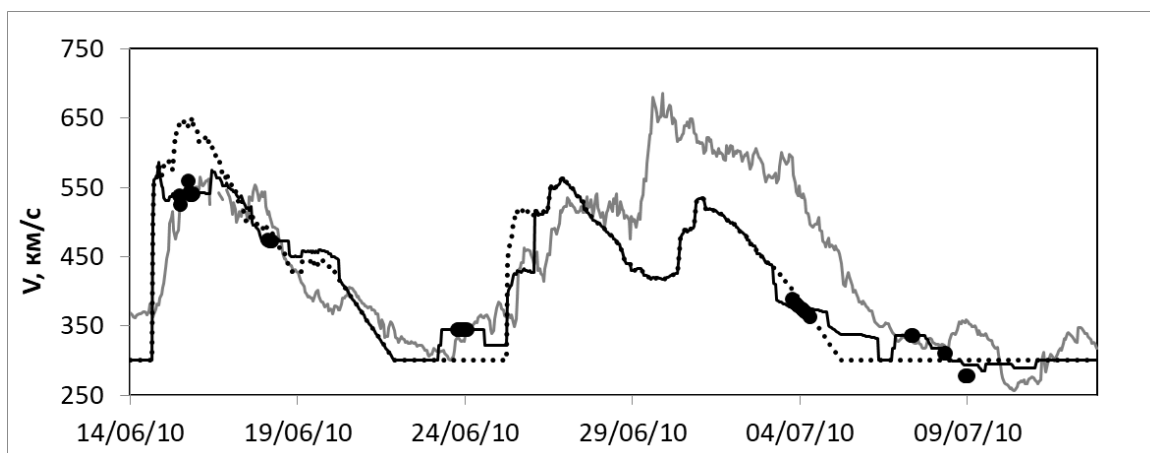


Рисунок 1. Серая кривая - наблюдаемая скорость СВ по данным с КА ACE, черная пунктирная кривая – прогноз скорости ВСП СВ по площадям корональных дыр. Черными кружками отмечены времена прихода и скорости МКВМ (в том числе для всех часов одного события). Черные линии на верхнем графике показывают время, влияния МКВМ на фоновый СВ, в течение которого вычисляются средние скорости между прогнозом ВСП и МКВМ. На нижнем графике черная кривая –совместный прогноз скорости ВСП СВ из корональных дыр и МКВМ.

На рисунке 1 приведен пример интеграции прогноза скорости МКВМ во временной ряд прогнозируемой скорости квазистационарных потоков солнечного ветра. Длительность КВМ определялась длительностью КВМ в коронографе, однако она могла быть увеличена или уменьшена в зависимости от результатов моделирования. Каждый час длительности МКВМ моделировался как независимый МКВМ согласно DBM. При этом начальная скорость у всех точек принималась одинаковой, и при одинаковой фоновой скорости длительность МКВМ сохранялась. Однако, при изменении фоновой скорости, время между прогнозом прихода первого и последнего часа события могло увеличиваться или уменьшаться относительно исходных данных. В работе [Temmer и др., 2017] было получено, что фоновому солнечному ветру требуется 2–5 дней для того, чтобы восстановиться от воздействия прохождения МКВМ, что достаточно много по сравнению со средней продолжительностью самого МКВМ (1.3 дня). Мы смоделировали, что воздействие МКВМ на фоновый СВ длится еще некоторое время после прогнозируемого момента прихода МКВМ на околоземную орбиту. Если одновременно на околоземную орбиту пришло несколько МКВМ с разными скоростями, то их скорости усреднялись (Рисунок 1, верхний график). Участок с 12 часами до и после спрогнозированного времени прихода МКВМ считался временем, когда на околоземной орбите наблюдались МКВМ с прогнозируемой скоростью, а временной интервал с 12 до 48 часов после считался областью с остаточными следами воздействия МКВМ на фоновый СВ. В данном упрощенном подходе влияние МКВМ на фоновый СВ рассчитывалось, как усреднение между спрогнозированными скоростями МКВМ и фонового СВ. На Рисунке 1 (нижний график) представлен прогноз скорости СВ, когда к прогнозу скорости ВСП СВ по площади корональных дыр был добавлен прогноз скорости МКВМ с помощью DBM модели.

Добавление прогноза МКВМ в прогноз фонового СВ улучшает общий прогноз скорости СВ на околоземной орбите. Среднеквадратичное отклонение между измеренными и спрогнозированными потоками СВ уменьшается с 91 до 86 км/с, а коэффициент корреляции увеличивается с 0.55 до 0.6. Большинство отобранных нами из базы данных КВМ, распространяющиеся по спрогнозированному фоновому ветру, дают вклад в медленные и не геоэффективные потоки солнечного ветра: 67 % из всех МКВМ пришли на околоземную орбиту со скоростями менее 400 км/с, а 90 из 94 МКВМ, связаны со спокойной геомагнитной обстановкой ($Dst > -30$ нТл).

Быстрые потоки солнечного ветра обычно вызывают более слабые геомагнитные возмущения, по сравнению с КВМ, однако такие события могут сопровождаться длительными суббуревыми возмущениями, что приводит к особым условиям в магнитосфере Земли, которые характеризуются высыпаниями высокоэнергичных электронов в радиационных поясах Земли, как было показано на примере бури в октябре 2017 года [Yakhnina и др., 2024], а также формированием тонких токовых слоев в плазменном слое хвоста магнитосферы [Leonenko и др., 2021]. Влияние КВМ на фоновый солнечный ветер, может повлиять на описываемые условия, что необходимо учитывать при прогнозировании магнитосферных эффектов.

Список публикаций по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях, из них в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ «eLibrary Science Index», международными базами данных (Web of Science, Scopus, RSCI) и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия:

1. Шугай Ю.С., Капорцева К.Б. Прогноз квазистационарных и транзиентных потоков солнечного ветра по данным наблюдений Солнца в 2010 г. Геомагнетизм и аэрономия, Т. 61, № 2, стр. 148–159 (2021). EDN: TXDDNP. Импакт-фактор 1.102 (РИНЦ). Объем 1.4 печатных листа. Личный вклад 40%. Shugay, Y.S., Kaportseva, K.B. Forecast of the Quasi-Stationary and Transient Solar Wind Streams Based on Solar Observations in 2010. Geomagnetism and Aeronomy. V. 61. № 2. P. 158-168 (2021). EDN: P XKSCW. Импакт-фактор 0.19 (JCI). Объем 1.2 печатных листа. Личный вклад 40%.
2. Капорцева К.Б., Шугай Ю.С. Использование DBM модели для прогноза прихода корональных выбросов массы к Земле. Космические исследования, Т. 59, № 4, стр. 315-326 (2021). EDN: KLJT TI. Импакт-фактор 0.909 (РИНЦ). Объем 1.4 печатных листа. Личный вклад 70%. Kaportseva, K.B., Shugay, Y.S. Use of the DBM Model to the Predict of Arrival of Coronal Mass Ejections to the Earth. Cosmic Research, V. 59, P. 268–279 (2021). EDN: АНКJHM. Импакт-фактор 0.16 (JCI). Объем 1.4 печатных листа. Личный вклад 70%.

3. Shugay Y., Kalegaev V., Kaportseva K., Slemzin V., Rodkin D., Ereemeev V., Modeling of Solar Wind Disturbances Associated with Coronal Mass Ejections and Verification of the Forecast Results. Universe, V. 8, N. 11, P. 565 (2022). EDN: SOOBQT. Импакт-фактор 0.55 (JCI). Личный вклад 40%. Объем 2.5 печатных листа.
4. Kaportseva, K.; Shugay, Y.; Vakhrusheva, A.; Kalegaev, V.; Shiryaev, A.; Ereemeev, V. CME Forecasting System: Event Selection Algorithm, Dimming Data Application Limitations, and Analysis of the Results for Events of the Solar Cycle 24. Universe, V. 10, N. 8, P. 321 (2024). EDN: YUJGRK. Импакт-фактор 0.55 (JCI). Личный вклад 80%. Объем 2.6 печатных листа.
5. V. Kalegaev, K. Kaportseva, I. Myagkova, Yu Shugay, N. Vlasova, W. Barinova, S. Dolenko, V. Ereemeev, and A. Shiryaev. Medium-term prediction of the fluence of relativistic electrons in geostationary orbit using solar wind streams forecast based on solar observations. Advances in Space Research, V. 72, N.12 P. 5376–5390, (2023). EDN: IZIMJQ. Импакт-фактор 0.77 (JCI). Личный вклад 10 %. Объем 1.8 печатных листа.

Иные публикации:

6. Ширяев А.О., Капорцева К.Б. Анализ различий каталогов межпланетных корональных выбросов массы и создание объединенного каталога. Ученые записки физического факультета Московского университета, № 4 (2023). EDN: ENEOZQ. Личный вклад 50%. Объем 1.2 печатных листа.

Литература

1. Abunina M. A. и др. On the features of great Forbush effect during May 2024 extreme geomagnetic storm // *Advances in Space Research*. 2025.
2. Amerstorfer T. и др. Evaluation of CME Arrival Prediction Using Ensemble Modeling Based on Heliospheric Imaging Observations // *Space Weather*. 2021. Т. 19. № 1.
3. Cane H. V., Richardson I. G. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996-2002 // *J Geophys Res Space Phys*. 2003. Т. 108. № A4.
4. Cargill P. J. On the Aerodynamic Drag Force Acting on Interplanetary Coronal Mass Ejections // *Sol Phys*. 2004. Т. 221. № 1. С. 135–149.
5. Chikunova G. и др. Coronal Dimmings Associated with Coronal Mass Ejections on the Solar Limb // *Astrophys J*. 2020. Т. 896. № 1. С. 17.
6. Chikunova G. и др. Three-dimensional relation between coronal dimming, filament eruption, and CME: A case study of the 28 October 2021 X1.0 event // *Astron Astrophys*. 2023. Т. 678.
7. Demekhov A. G. и др. Frequency Dependence of Very Low Frequency Chorus Poynting Flux in the Source Region: THEMIS Observations and a Model // *Geophys Res Lett*. 2020. Т. 47. № 6.
8. Dissauer K. и др. Statistics of Coronal Dimmings Associated with Coronal Mass Ejections. II. Relationship between Coronal Dimmings and Their Associated CMEs // *Astrophys J*. 2019. Т. 874. № 2. С. 123.
9. Dumbović M. и др. The Drag-based Ensemble Model (DBEM) for Coronal Mass Ejection Propagation // *Astrophys J*. 2018. Т. 854. № 2. С. 180.
10. Dumbović M. и др. Drag-Based Model (DBM) Tools for Forecast of Coronal Mass Ejection Arrival Time and Speed // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2021. Т. 8.
11. Grigorenko E. E. и др. Intense Electric Currents and Energy Conversion Observed at Electron Scales in the Plasma Sheet During Propagation of High-Speed Ion Bulk Flows // *J Geophys Res Space Phys*. 2024. Т. 129. № 6.
12. Guo J. и др. Modeling the Evolution and Propagation of 10 September 2017 CMEs and SEPs Arriving at Mars Constrained by Remote Sensing and In Situ Measurement // *Space Weather*. 2018. Т. 16. № 8. С. 1156–1169.
13. Harrison R. A. и др. Coronal dimming and the coronal mass ejection onset // *Astron Astrophys*. 2003. Т. 400. № 3.
14. Hess P., Zhang J. A Study of the Earth-Affecting CMEs of Solar Cycle 24 // *Sol Phys*. 2017. Т. 292. № 6.
15. Jian L. и др. Properties of interplanetary coronal mass ejections at one AU during 1995 - 2004 // *Sol Phys*. 2006. Т. 239. № 1–2. С. 393–436.
16. Kalegaev V. V., Vlasova N. A. The Earth's magnetosphere response to interplanetary medium conditions on January 21–22, 2005 and on December 14–15, 2006 // *Advances in Space Research*. 2014. Т. 54. № 3. С. 517–527.
17. Kraaikamp E., Verbeeck C. Solar Demon – an approach to detecting flares, dimmings, and EUV waves on SDO/AIA images // *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2015. Т. 5. С. A18.
18. Leonenko M. V. и др. MMS Observations of Super Thin Electron-Scale Current Sheets in the Earth's Magnetotail // *J Geophys Res Space Phys*. 2021. Т. 126. № 11.

19. Liu H. и др. Predicting Coronal Mass Ejections Using *SDO* /HMI Vector Magnetic Data Products and Recurrent Neural Networks // *Astrophys J.* 2020. Т. 890. № 1. С. 12.
20. Liu J. и др. A New Tool for CME Arrival Time Prediction using Machine Learning Algorithms: CAT-PUMA // *Astrophys J.* 2018. Т. 855. № 2. С. 109.
21. Mason J. P. и др. RELATIONSHIP OF EUV IRRADIANCE CORONAL DIMMING SLOPE AND DEPTH TO CORONAL MASS EJECTION SPEED AND MASS // *Astrophys J.* 2016. Т. 830. № 1.
22. Mays M. L. и др. Ensemble Modeling of CMEs Using the WSA–ENLIL+Cone Model // *Sol Phys.* 2015. Т. 290. № 6. С. 1775–1814.
23. Millward G. и др. An operational software tool for the analysis of coronagraph images: Determining CME parameters for input into the WSA-Enlil heliospheric model // *Space Weather.* 2013. Т. 11. № 2. С. 57–68.
24. Palmerio E. и др. CMEs and SEPs During November–December 2020: A Challenge for Real-Time Space Weather Forecasting // *Space Weather.* 2022. Т. 20. № 5.
25. Pomoell J., Poedts S. EUHFORIA: European heliospheric forecasting information asset // *Journal of Space Weather and Space Climate.* 2018. Т. 8.
26. Riley P. и др. Forecasting the Arrival Time of Coronal Mass Ejections: Analysis of the CCMC CME Scoreboard // *Space Weather.* 2018. Т. 16. № 9. С. 1245–1260.
27. Rodkin D. G., Slemzin V. A., Shugay Y. S. Geomagnetic Storms and Forbush-Decreases Related to Single and Complex Transient Structures of Solar Wind // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute.* 2020. Т. 47. № 3.
28. Rollett T. и др. EIEvoHI: A NOVEL CME PREDICTION TOOL FOR HELIOSPHERIC IMAGING COMBINING AN ELLIPTICAL FRONT WITH DRAG-BASED MODEL FITTING // *Astrophys J.* 2016. Т. 824. № 2. С. 131.
29. Shiota D., Kataoka R. Magnetohydrodynamic simulation of interplanetary propagation of multiple coronal mass ejections with internal magnetic flux rope (SUSANOO-CME) // *Space Weather.* 2016. Т. 14. № 2.
30. Shlyk N. S. и др. Forbush decreases caused by paired interacting solar wind disturbances // *Mon Not R Astron Soc.* 2022. Т. 511. № 4.
31. Shugay Y. S. и др. Prediction of geoeffective solar wind streams near earth according to solar observational data // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute.* 2017. Т. 44. № 10.
32. Shugay Yu. S. и др. Hierarchical approach to forecasting recurrent solar wind streams // *Solar System Research.* 2011. Т. 45. № 6. С. 546–556.
33. Taktakishvili A. и др. Validation of the coronal mass ejection predictions at the earth orbit estimated by ENLIL heliosphere cone model // *Space Weather.* 2009. Т. 7. № 3.
34. Temmer M. и др. Preconditioning of Interplanetary Space Due to Transient CME Disturbances // *Astrophys J.* 2017. Т. 835. № 2.
35. Temmer M. и др. CME propagation through the heliosphere: Status and future of observations and model development // *Advances in Space Research.* 2023.
36. Temmer M., Preiss S., Veronig A. M. CME Projection Effects Studied with STEREO/COR and SOHO/LASCO // *Sol Phys.* 2009. Т. 256. № 1–2. С. 183–199.

37. Tulupov V. I. и др. Motion and transport of solar cosmic rays in heliospheric traps: The event on January 28–31, 2001 // *Cosmic Research*. 2012. Т. 50. № 6. С. 397–404.
38. Vakhrusheva A. A. и др. Parameters of Coronal Dimmings and Their Variations during Solar Cycle 24 // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024. Т. 64. № 1. С. 1–10.
39. Verbeke C. и др. Quantifying errors in 3D CME parameters derived from synthetic data using white-light reconstruction techniques // 2023.
40. Vourlidis A., Patsourakos S., Savani N. P. Predicting the geoeffective properties of coronal mass ejections: Current status, open issues and path forward // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2019. Т. 377. № 2148.
41. Vršnak B. Forces governing coronal mass ejections // *Advances in Space Research*. 2006. Т. 38. № 3. С. 431–440.
42. Vršnak B. и др. Propagation of Interplanetary Coronal Mass Ejections: The Drag-Based Model // *Sol Phys*. 2013. Т. 285. № 1–2. С. 295–315.
43. Wang Y. и др. CME Arrival Time Prediction Using Convolutional Neural Network // *Astrophys J*. 2019. Т. 881. № 1. С. 15.
44. Yakhnina T. A. и др. Relativistic electron eruptions associated with the weakening of the magnetic field in the area of the South Atlantic anomaly during the geomagnetic storm on October 10-17, 2017 // *PHYSICS OF AURORAL PHENOMENA*. 2024. Т. 47. № 1. С. 64–67.
45. Yermolaev Y. I. и др. Catalog of large-scale solar wind phenomena during 1976-2000 // *Cosmic Research*. 2009. Т. 47. № 2. С. 81–94.
46. Yermolaev Y. I. и др. Geoeffectiveness and efficiency of CIR, sheath, and ICME in generation of magnetic storms // *J Geophys Res Space Phys*. 2012. Т. 117. № A9.
47. Zelenyi L. M. и др. Current Structures with Magnetic Shear in Space Plasma // *JETP Lett*. 2018. Т. 108. № 8. С. 557–569.
48. Zhao X., Dryer M. Current status of CME/shock arrival time prediction // *Space Weather*. 2014. Т. 12. № 7. С. 448–469.
49. Žic T., Vršnak B., Temmer M. HELIOSPHERIC PROPAGATION OF CORONAL MASS EJECTIONS: DRAG-BASED MODEL FITTING // *Astrophys J Suppl Ser*. 2015. Т. 218. № 2. С. 32.