

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Капорцева Ксения Борисовна

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

Специальность – 1.3.1 Физика космоса, астрономия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Доктор физико-математических наук
Калегаев Владимир Владимирович

Оглавление

Введение.....	4
Цели и задачи диссертационной работы	Ошибка! Закладка не определена.
Объект и предмет исследования.....	7
Методология исследования.....	Ошибка! Закладка не определена.
Научная новизна.....	Ошибка! Закладка не определена.
Научная и практическая значимость.	Ошибка! Закладка не определена.
Положения, выносимые на защиту ...	Ошибка! Закладка не определена.
Степень достоверности результатов	8
Личный вклад	Ошибка! Закладка не определена.
Апробация	Ошибка! Закладка не определена.
Список публикаций по теме диссертации	11
Иные публикации:.....	Ошибка! Закладка не определена.
Содержание.....	15
Глава 1. Обзор литературы	20
1.1. Корональные выбросы массы и их характеристики на Солнце и в межпланетной среде.....	20
1.2. Современное состояние	22
1.3. Описание модели распространения KBM (Drag-based model).....	30
Глава 2. Моделирование распространения KBM по переменному фоновому ветру	39
2.1. Модель квазистационарных потоков солнечного ветра (КСВ) ...	39
2.2. DBM с использованием переменного фонового ветра.....	40

2.3.	Выбор входных данных для тестирования	41
2.4.	Результаты прогноза прихода КВМ в 2010-2011 гг.....	43
2.5.	Обсуждение результатов	58
Глава 3.	Объединенный каталог МКВМ для верификации прогноза	60
3.1.	Каталоги МКВМ.....	60
3.2.	Создание объединенного каталога	64
3.3.	Анализ объединенного каталога.....	68
Глава 4.	Прогнозирование КВМ в 23 цикле солнечной активности	73
4.1.	Система прогнозирования прихода КВМ в НИИЯФ МГУ	73
4.2.	Результаты за 23 цикл солнечной активности.....	86
4.3.	Особенности прогнозирования на спаде цикла солнечной активности.....	96
4.4.	Обсуждение результатов	101
Глава 5.	Использование прогноза КВМ для моделирования скорости солнечного ветра на орбите Земли	106
5.1.	Отбор событий для прогноза.....	106
5.2.	Входные параметры модели	109
5.3.	Профиль скорости КВМ	110
5.4.	Результаты моделирования	111
5.5.	Выводы	114
Заключение		116
Литература		118

Введение

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.

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 KBM. 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 KBM 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 KBM и параметры солнечного ветра для прогноза времени прибытия. Хотя нейросетевые подходы демонстрируют перспективные результаты, они пока не позволяют однозначно определить факт прибытия KBM на Землю. Существуют также попытки прогнозировать сами события KBM по данным с SDO/HMI [Liu и др., 2020], что открывает новые направления. Для прогнозирования прихода KBM разрабатываются также статистические подходы, например модель ИЗМИРАН [Shlyk и др., 2022], позволяющая получать время и скорость прихода KBM 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 KBM 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 KBM на ранней стадии их прогнозирования. Для этого можно использовать наблюдения коронографа, а также комбинировать их с наблюдениями солнечного диска, что позволяет определять координаты источника KBM 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.

Объект и предмет исследования

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.

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

САСТus 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 KBM и согласуются с теоретическими представлениями и наблюдениями.

Результаты моделирования верифицировались путем сопоставления с фактическими событиями, перечисленными в общеизвестных и широко используемых каталогах MKBM 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 KBM. 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 KBM 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 KBM для моделирования на основе данных коронографа LASCO (каталог CACTus) и диммингов из базы Solar Demon. Было выполнено сопоставление событий, сформирован список KBM 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 KBM (MKBM) для моделирования на

основе каталогов Ричардсона и Кейна, а также GMU CME List. Эти данные были дополнены информацией о соответствующих KBM 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 MKBM 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 MKBM 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 (Kaporitseva et al., 2024, личный вклад 80%) Капорцева К.Б. сформулировала окончательную версию алгоритма отбора событий и алгоритм объединения каталогов MKBM, на основании которых был получен интегрированный каталог MKBM. 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 MKBM 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., Калегаев 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., Калегаев 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., Eremeev 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., Калегаев 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., Калегаев 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., Калегаев 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., Калегаев 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., Калегаев 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 SMD CME Forecasting System: An Analysis of the Geoeffective Event Selection Algorithm Kaportseva K., Shugay Yu, Vakhrusheva A., Shiryaev A., Eremeev V., Kalegaev V. COSPAR 2024 scientific assembly, Пусан, Корея, Республика, 13-21 июля 2024

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: PXKSCW. 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: KLJTIT. 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.; Shiryayev, 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. Shiryayev. 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: ЕНЕОZQ. Личный вклад 50%. Объем 1.2 печатных листа.

Содержание

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 101 наименование. Общий объем текста — 127 страниц. Работа содержит 20 рисунков.

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 KBM в гелиосфере. Модель подробно описана и проанализирована в работах [Dumbović и др., 2021; Vršnak, 2006a; 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.

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 KA 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.

Также проанализированы различные наборы входных данных и показано, что лучшие результаты прогноза достигаются при использовании данных из БД SACTus, в приближении равномерного распространения КВМ 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. Средняя ошибка по всем событиям в случае использования базы данных SACTus 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 КВМ на околоземную орбиту. Для реализации такой оценки спрогнозированное время прихода сравнивается с наблюдаемым временем регистрации МКВМ на околоземной орбите. Однако, определение точного времени прихода МКВМ по данным *in situ* зачастую представляет собой сложную задачу. Обычно исследователи используют существующие каталоги регистрации МКВМ на орбите Земли, либо применяют экспертную оценку для каждого конкретного случая.

Предложен алгоритм объединения существующих каталогов МКВМ, обоснована необходимость такого объединения, и проведен его анализ объединенного каталога МКВМ (ОК МКВМ) для периода 2010–2023 годы. В результате объединения получается список из 400 событий с пересечениями между разными исходными каталогами. 147 событий (37%) из ОК МКВМ присутствовали как минимум в двух исходных каталогах, а 33 события были упомянуты во всех исходных каталогах.

В четвертой главе

описывается схема системы для онлайн прогнозирования времени и скорости корональных выбросов массы. 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 фонового 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.

Здесь также описан алгоритм отбора событий, способной работать автоматически в режиме близком к реальному времени. Алгоритм основан на отборе KBM, зарегистрированных в БД CACTus по данным LASCO, по угловым параметрам, объединении смежных KBM, установлении соответствия KBM-димминг, и отбора сопоставленных событий по параметрам димминга.

Для валидации результатов было посчитано количество событий следующих множеств: которые были предсказаны и наблюдались (т.е. могли быть сопоставлены с событием из каталога MKBM 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, а также среднее и среднее абсолютное значения ошибок по всему набору и стандартное отклонение.

В конце главы приведены результаты работы системы отбора и анализ результирующих прогнозов для времени и скорости прибытия KBM для различных валидационных наборов, различных фаз цикла солнечной активности, и наборов MKBM, связанных с геомагнитной обстановкой разного уровня возмущенности.

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

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.

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).

Глава 1. Обзор литературы

1.1. Корональные выбросы массы и их характеристики на Солнце и в межпланетной среде

Для идентификации МКВМ используются различные признаки, по которым ударную волну, область сжатия, и само тело МКВМ можно определить по характерным вариациям параметров плазмы и межпланетного магнитного поля, измеряемым на космических аппаратах (КА) ACE, WIND, DSCOVR, находящихся в окрестности точки Лагранжа L1, на линии Солнце Земля в 1 500 000 км от Земли. Это расстояние потоки солнечного ветра преодолевают за 25-80 минут при скорости потока в 1000-300 км/с соответственно.

Основные признаки позволяющие идентифицировать МКВМ основаны на физических представлениях о механизмах его формирования. Если КВМ – это выброс плазмы из солнечной атмосферы вследствие взрывных процессов на Солнце, то при высокой скорости КВМ на переднем фронте должна образовываться ударная волна, которая характеризуется резким скачком плотности плазмы. Область сжатия характеризуется более турбулентным поведением параметров и плотной и горячей плазмой. А тело МКВМ может характеризоваться разнообразными наборами параметров в зависимости от его пространственной структуры и размеров, интенсивности магнитного поля и особенностей корональных источников. В числе универсальных маркеров можно выделить следующие (Zurbuchen & Richardson, 2006):

- Падение скорости внутри тела МКВМ, как следствие его расширения;
- Более низкая температура протонов в теле МКВМ, как следствие его расширения и более регулярного магнитного поля;

- Повышенное значение модуля ММП и регулярное поведение компонент вектора ММП (вращение магнитного поля), как следствие регистрации магнитного жгута;
- Двухнаправленные потоки электронов с энергиями более 100 эВ, которые двигаются по магнитным линиям внутри магнитного жгута;
- Повышенное содержание высокозарядных ионов ($\text{He}^{++}/\text{H}^+$, $\text{O}^{7+}/\text{O}^{6+}$), более высокий средний заряд ионов железа как характеристика условий на той высоте солнечной атмосферы, где зародился выброс.

На расстоянии 1 а.е. плазма МКВМ характеризуется средним значением ММП около 10 нТл, согласно [Chi и др., 2016; Richardson, Cane, 2010]. Для магнитных облаков эта величина выше, чем для остальных КВМ (17.2 ± 8.2 нТл против 11.3 ± 5.5 нТл согласно [Kilpua, Koskinen, Pulkkinen, 2017]). Скорость распространения тела МКВМ в среднем приближена к средней скорости солнечного ветра и равняется 450-480 км/с [Chi и др., 2016; Kilpua, Koskinen, Pulkkinen, 2017; Richardson, Cane, 2010]. Однако, отношение скорости в области ударной волны к скорости невозмущенного солнечного ветра может достигать 4 согласно [Kilpua и др., 2015]. Порядка 80% МКВМ характеризуются отрицательным градиентом скорости внутри тела МКВМ. Состав плазмы МКВМ характеризуется повышенным значением соотношения $\text{O}^{+7}/\text{O}^{+6} > 1$ и средним зарядом железа выше 12 [Kilpua, Koskinen, Pulkkinen, 2017]). Длительность регистрации МКВМ составляет 20-30 часов.

Количество МКВМ показывает корреляцию с числом солнечных пятен с коэффициентом 0.8, однако для МКВМ типа магнитное облако коэффициент корреляции падает до 0.42 [Chi и др., 2016]. Доля магнитных облаков среди всех МКВМ возрастает в минимуме солнечной активности, а в максимуме солнечной активности составляет 10-60%.

Возможность среднесрочного прогноза прихода МКВМ с заблаговременностью 2-5 суток обеспечивает раннее наблюдение КВМ в солнечной хромосфере и короне с помощью солнечных телескопов. По данным за 1996-2012, полученным в работах [Vourlidas и др., 2010; Webb, Howard, 2012], КВМ наблюдаемые в коронографе в среднем имеют следующие параметры: скорость порядка 489 км/с, ускорение от -16 до 5 км/с², угловую ширину раствора конуса КВМ 47 градусов и массу порядка $1.3 \cdot 10^{15}$ кг

1.2. Современное состояние

Оценка времени прибытия корональных выбросов массы (КВМ) к орбите Земли представляет собой одну из ключевых задач в области исследований космической погоды. Воздействие КВМ на магнитосферу Земли способно вызывать интенсивные геомагнитные возмущения, которые могут отрицательно сказываться как на функционировании аэрокосмических систем, так и на элементах наземной инфраструктуры. Как правило, появление КВМ в солнечной короне фиксируется с помощью коронографов, установленных на космических аппаратах, так как наземные наблюдения ограничены. Однако общее число КВМ, регистрируемых коронографами, существенно превышает количество событий, сопровождающихся геомагнитными бурями. Это обстоятельство делает задачу прогнозирования особенно сложной, поскольку требует не только высокой точности оценки параметров выброса и прогноза его и прихода, но и предварительного отбора событий, способных достичь Земли и оказать значительное воздействие на её магнитосферу. В настоящее время в данной области ведут активную работу многочисленные научные коллективы, предлагая разнообразные модели и подходы к решению задачи. Подробный обзор современных достижений и методов приведён, в частности,

в работах [Riley и др., 2018; Temmer и др., 2023; Vourlidas, Patsourakos, Savani, 2019; Zhao, Dryer, 2014].

Платформа CME Scoreboard, разработанная CCMC (Community coordinating modeling center, NASA), служит средой для оперативного представления прогнозов времени прибытия ударных волн, сопровождающих KBM, различными научными группами сразу после регистрации события с помощью коронографических наблюдений. Обзор пятилетней деятельности CME Scoreboard (с 2013 года по май 2018 года), охватывающий прогнозы, полученные с применением 32 различных моделей, представлен в работе [Riley и др., 2018]. Сравнительный анализ шести наиболее активно используемых моделей показал, что среднее абсолютное отклонение прогнозов времени прибытия составляет от 13,1 до 17,3 часа, при этом стандартное отклонение лежит в диапазоне от 15,5 до 23,8 часа. Зафиксированные экстремальные значения ошибок варьируются от -66,9 до +69,5 часа.

Современные программные технологии позволяют выполнять детализированное моделирование отдельных процессов и событий, таких как развитие KBM в нижней короне [Кау и др., 2016] или взаимодействие различных потоков солнечного ветра [Scolini и др., 2020] с учётом всех доступных наблюдательных данных и физических моделей. Однако для оперативной деятельности центров космической погоды критически важно, чтобы применяемые методы и данные были доступны в режиме, близком к реальному времени, что необходимо для составления среднесрочных прогнозов.

Одной из наиболее известных и широко применяемых моделей гелиосферы является WSA–ENLIL+Cone. Она сочетает описание фонового солнечного ветра на основе модели Ванга–Шили–Арге (WSA), распространение KBM в межпланетной среде по модели ENLIL, а также включает геометрическое

представление KBM в рамках модели конуса (Cone model). Вариант модели WSA–ENLIL+Cone, используемый NASA, подробно описан в работе [Taktakishvili и др., 2009]. Модель WSA опирается на эмпирическую зависимость между скоростью солнечного ветра и коэффициентом расширения корональных магнитных трубок (coronal flux tube expansion factor), который можно определить на основе солнечных магнитограмм [Arge, Pizzo, 2000; Wang, Sheeley, 1990]. Результаты расчётов WSA используются в качестве граничных условий на внутренней границе модели ENLIL (на расстоянии 21,5 радиусов Солнца) для численного моделирования магнитогидродинамической (МГД) эволюции солнечного ветра и внедрённых KBM [Odstrčil, Pizzo, 1999].

Входные данные для модели ENLIL включают время появления KBM, его скорость на внутренней границе и параметры, задаваемые моделью конуса [Xie, 2004]. Эти параметры извлекаются из изображений KBM, полученных с помощью коронографов, посредством стереоскопического анализа (StereoCAT) [Mays и др., 2015] и с помощью инструмента анализа KBM Центра прогнозирования космической погоды NOAA (CAT) [Millward и др., 2013]. Оба инструмента требуют участия специалиста, осуществляющего ручную обработку коронографических изображений с целью извлечения параметров KBM, что в свою очередь ограничивает возможности применения модели WSA–ENLIL+Cone в условиях, требующих прогноза в реальном времени.

EUNFORIA представляет собой ещё одну модель, широко применяемую в прогнозировании космической погоды, в которой используются различные методы в зависимости от области пространства. Для моделирования процессов в нижней короне применяется модель потенциального поля с поверхностным источником (potential field source surface model; [Wang, Sheeley, 1992]), тогда как для верхней короны используется модель токового слоя Шаттена. Магнитогидродинамическое (МГД) моделирование в гелиосферной области начинается с расстояния 0,1 астрономической единицы и может выполняться

до 2 а.е. Для описания KBM с выраженным магнитным полем используется линейная бессиловая модель типа сферомака (linear force-free spheromak model), тогда как для остальных выбросов применяется модель конуса [Pomoell, Poedts, 2018; Sindhuja и др., 2022] EUNFORIA является эффективным инструментом для моделирования сложных событий, однако разработка её онлайн-версии, способной функционировать в режиме реального времени, пока остаётся одной из целей дальнейшего развития модели [Poedts и др., 2020].

Модель SUSANOO основана на трёхмерном МГД моделировании солнечного ветра, при этом корональные выбросы массы вводятся на расстоянии 30 солнечных радиусов в виде магнитной петли со структурой сферомака [Shiota, Kataoka, 2016]. Подобно EUNFORIA, модель SUSANOO позволяет получать точные решения для отдельных событий, что ценно для улучшения моделей и углубления понимания природы и распространения KBM. Однако, как и в случае с EUNFORIA, SUSANOO в настоящее время не обладает доступной для пользователей онлайн-реализацией, пригодной для оперативного прогноза в режиме реального времени.

Помимо магнитогидродинамических (МГД) моделей, в прогнозировании распространения KBM применяются и численные модели. Одной из наиболее широко используемых является модель, основанная на предположении о влиянии на распространение KBM аэродинамического сопротивления из-за взаимодействия выброса с фоновым ветром— так называемая Drag-Based Model (DBM) [Vršnak и др., 2013; Žic, Vršnak, Temmer, 2015]. DBM вычисляет время и скорость KBM как функцию расстояния от Солнца. Закон движения KBM строится на предположении о том, что на KBM действует лишь аэродинамическое сопротивление, вызванное разницей скоростей между KBM и фоновым солнечным ветром.

В качестве входных параметров модель DBM использует скорость и время выброса на внутренней границе (около 20 солнечных радиусов), а также скорость фонового солнечного ветра, которую можно задать как постоянную или получить из других моделей. Для учёта геометрических характеристик выброса в DBM может быть включена модель конуса [Dumbović и др., 2021]. Несколько реализаций DBM доступны на веб-платформе <https://oh.geof.unizg.hr/DBM/dbm.php>, где пользователи могут тестировать модель на собственных данных.

На основе DBM также разработан инструмент ELEvoHI, использующий данные с изображений прибора HI на борту миссии STEREO и предполагающий эллиптическую форму KBM [Rollett и др., 2016]. Исходный код ELEvoHI размещён в открытом доступе на GitHub и может применяться как для научных исследований, так и в прогнозных задачах. Последняя версия модели реализует ансамблевый подход и включает возможность моделирования деформируемого переднего фронта KBM. Кроме того, в [Amerstorfer и др., 2021] обсуждаются перспективы использования ELEvoHI в системах прогноза в реальном времени.

Альтернативным направлением в задачах прогнозирования космической погоды является применение методов машинного обучения, в частности нейронных сетей. Одним из примеров такого подхода является модель SAT-PUMA [Liu и др., 2018], продемонстрировавшая хорошие результаты при расчёте времени прибытия KBM на основе ретроспективных данных: для 54 % событий из тестовой выборки из 20 событий абсолютная ошибка прогноза не превышала 5,9 часов. В исследовании были использованы несколько каталогов межпланетных KBM, зафиксированных на орбите Земли в период с 1996 по 2015 годы. Из них отбирались события с угловой шириной более 90° и известной массой. Итоговый набор из 182 KBM был разделён на обучающую и тестовую выборки. Для построения прогноза применялся алгоритм опорных

векторов с 12 входными параметрами, включающими характеристики выброса, координаты его источника, а также параметры фонового солнечного ветра, полученные по данным *in situ*. Однако авторы подчёркивают, что модель способна предсказывать лишь время прибытия уже отобранных вручную событий и не позволяет определить факт прибытия КВМ на Землю.

Более современный подход был предложен в работе [Wang и др., 2019], где в качестве входных данных непосредственно используется изображение с коронографа, без необходимости выделения набора параметров. Это существенно упрощает подготовку входных данных и повышает удобство использования модели. Алгоритм демонстрирует высокую скорость и точность вычислений, однако, как и SAT-PUMA, не решает задачу определения, достигнет ли КВМ Земли.

Дополнительный интерес представляет методика, описанная в [Liu и др., 2020], где для прогнозирования возникновения КВМ и связанных с ними вспышек в активных областях применяются данные инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) на борту обсерватории SDO и рекуррентные нейронные сети. Данный подход показал хорошие результаты в прогнозе появления КВМ, однако не позволяет оценить вероятность геоэффективности события.

Наряду с нейросетевыми методами ведутся разработки статистических моделей. В частности, модель, созданная в ИЗМИРАН [Shlyk и др., 2023], позволяет оценивать время и скорость прибытия КВМ к Земле на основе его начальной скорости, гелиодолготы источника и скорости фонового солнечного ветра. Такие подходы обеспечивают простую и оперативную оценку параметров прибытия КВМ и могут служить дополнением к более сложным моделям прогнозирования.

Некоторые исследовательские коллективы привлекают волонтеров для визуального анализа изображений с целью выявления событий KBM и последующего прогнозирования времени их прибытия. Одним из таких проектов является Solar Stormwatch (SSW), описанный в работе [Tucker-Hood и др., 2015], в основе которого лежит предположение, что коллективные решения группы волонтеров могут быть сопоставимы по качеству с мнением эксперта. Используя данные прибора HI миссии STEREO, участники SSW вручную определяют момент входа KBM в поле зрения камеры и выбирают ключевые точки на изображениях для оценки траектории выброса. Анализ показал, что из 64 предсказанных KBM 20 действительно достигли Земли, а из 636 непредсказанных — 36 оказались геоэффективными, что соответствует доле успешных предсказаний около 31 %.

Одной из существенных проблем, ограничивающих точность прогнозов, остаётся недостаточная доступность ключевых параметров KBM, таких как скорость и направление распространения. Как правило, выбросы массы наблюдаются в белом свете с помощью коронографов. При наличии многоспутниковых наблюдений, как в случае с STEREO (A и B), возможно применение методов триангуляции, что позволяет более точно определить кинематические характеристики KBM. Однако в случае использования данных с единственного аппарата, например SOHO/LASCO или наземных телескопов, можно получить лишь проекцию скорости на плоскость изображения, что значительно увеличивает неопределённость. Существуют различные методы компенсации этой неопределённости — от ручной коррекции траектории до ансамблевых моделей прогноза.

Так, в работе [Temmer, Preiss, Veronig, 2009] для повышения точности оценки скорости применена триангуляция с использованием комбинации данных STEREO (A и B) и SOHO/LASCO. Однако начиная с 2014 года данные от STEREO-B стали недоступны, что ограничило возможности многоточечных

наблюдений. Некоторые модели продолжают использовать STEREO-A в сочетании с LASCO, но этот подход эффективен только при благоприятной конфигурации спутников [Millward и др., 2013; StereoCAT].

В недавнем исследовании [Verbeke и др., 2023] было проанализировано влияние качества ручной обработки изображений на точность прогноза прибытия KBM. Для этого были сгенерированы изображения синтетических KBM с известными параметрами, и пользователям предлагалось вручную определить эти параметры по белосветовым изображениям. Результаты показали, что для большинства случаев необходимы данные как минимум с двух точек наблюдения, чтобы уменьшить неопределённость в определении параметров выброса. Ошибки в извлечении параметров приводили к отклонениям во времени прибытия в пределах 5 часов и менее, однако в реальных условиях, как подчёркивают авторы, эти ошибки могут быть значительно больше.

Следующий подход заключается в определении источника KBM на поверхности Солнца и использовании координат источника для коррекции скорости KBM [Paouris и др., 2021]. Инструмент Atmospheric Imaging Assembly (AIA), установленный на борту аппарата SDO, способен генерировать изображения высокого разрешения различных слоёв солнечной атмосферы, что значительно облегчает идентификацию потенциальных источников KBM, а также связанных с ними явлений — таких как солнечные вспышки, корональные димминги и протуберанцы. Координаты этих объектов могут быть определены по изображениям AIA. До появления SDO подобные наблюдения выполнялись с использованием данных SOHO/EIT, однако AIA обладает рядом преимуществ — более высоким пространственным и временным разрешением, а также современной инфраструктурой хранения и обработки данных.

Современным и активно применяемым методом в области прогноза является ансамблевое моделирование

[Dumbović и др., 2018; Hinterreiter и др., 2021]. Этот подход основан на выполнении серии независимых запусков модели с варьируемыми входными параметрами. Полученные прогнозы затем объединяются в ансамбль, что позволяет анализировать распределение возможных исходов, рассчитывать статистические характеристики и оценивать уровень неопределённости. Преимуществом ансамблевого подхода является более полное представление о возможных сценариях развития событий и снижение риска недооценки погрешностей.

Таким образом, задача прогнозирования времени прибытия и скорости КВМ остаётся крайне сложной и требует интеграции наблюдательных данных, физических моделей и методов анализа. Выбор конкретного подхода определяется поставленной задачей, доступными ресурсами и требованиями к точности прогноза. В настоящее время разработано множество моделей и методов, каждый из которых обладает своими достоинствами и ограничениями. Исследования в этой области продолжаются, направлены на повышение точности и устойчивости прогнозов, а также на разработку новых инструментов, способных обеспечить более надёжный анализ космической погоды

1.3. Описание модели распространения КВМ (Drag-based model)

1.3.1. Математическое описание

DBM – одна из эмпирических моделей для прогнозирования распространения КВМ в гелиосфере. Модель подробно описана и проанализирована в работах [Dumbović и др., 2021; Vršnak, 2006a; Vršnak и др., 2013; Žić, 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

$$11 \quad a = \gamma(v - w)|v - w|,$$

, 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

$$22 \quad \gamma = \frac{c_d A \rho_{sw}}{M + M_v},$$

, 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] γ может принимать значения $(0,1 - 2) \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}$.

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

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

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

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

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

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

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

1.3.2. Ограничения модели

Важно затронуть вопрос о физических ограничениях использования модели. Характер распространения КВМ в гелиосфере во многом определяется его эволюцией на ранних стадиях. Согласно современным представлениям, выброс корональной массы на ранних стадиях представляет собой поднимающиеся магнитные петли с холодной материей (протуберанец). На определенной стадии, соответствующей отрыву магнитных петель у основания (магнитному пересоединению), начинается быстрое ускорение выброса, обусловленное действием силы Лоренца, возникающей из-за электрических токов.

Допущение о том, что на выброс действует только сила вязкого трения, и можно пренебречь действием гравитационного притяжения Солнцем и силы Лоренца подробно обсуждается в работе (Vršnak, 2006). Автор приходит к выводу, что все силы ослабевают с увеличением гелиоцентрического расстояния. При этом относительный вклад каждой силы в движение выброса зависит от расстояния до Солнца, скорости и других характеристик выброса. Сила Лоренца доминирует на более близких к Солнцу расстояниях и может давать значительный вклад в ускорение выброса на расстояниях до 30 солнечных радиусов от Солнца, особенно это заметно для высокоскоростных КВМ (со скоростью более 1000 км/с). Пренебрежение силой Лоренца в таких случаях будет причиной недооценки скорости КВМ и отставанию модели от наблюдения.

Начиная с 20 солнечных радиусов значительный вклад в движение КВМ начинает давать аэродинамическое сопротивление, что приводит к ускорению низкоскоростных КВМ и замедлению КВМ, скорость которых выше скорости

фонового солнечного ветра. Таким образом, существует период, в который сила Лоренца и сила аэродинамического трения компенсируют друг друга, до тех пор, пока аэродинамическое сопротивление не начинает доминировать.

Базовая DBM, описанная в работе [Vršnak и др., 2013] применяется в приближении, что выброс представляет собой расширяющееся тело, распространяющееся в среде, имеющей постоянную скорость. Утверждение, что параметр γ тоже можно считать постоянным, получается, если в выражении 2 считать, что плотность фонового ветра спадает пропорционально квадрату гелиоцентрического расстояния, а поперечное сечение выброса растет пропорционально этой же величине. Однако в этом случае, для постоянства γ безразмерный параметр c_d тоже должен оставаться постоянным на рассматриваемом участке пути KBM, что может не соблюдаться и, как следствие, приводить к неточностям моделирования. Еще одно допущение, это рост сечения KBM пропорционально квадрату гелиоцентрического расстояния. Данные наблюдений коронографов показывают, что это справедливо для близких к Солнцу расстояний, однако может не соблюдаться на далеких расстояниях, согласно данным КА Вояджер, Пионер, Гелиос.

Отдельная дискуссия касается примитивного описания фонового солнечного ветра, по которому распространяется выброс. Среда должна быть пространственно-однородной, чтобы одинаково действовать на все части выброса, а также иметь постоянную скорость на всём пути распространения выброса. Однако, это не всегда так: быстрые потоки солнечного ветра могут догонять более медленные, образуя области взаимодействия со сложной структурой, и KBM может взаимодействовать с такими структурами. Случаи множественных KBM, где выбросы распространяются друг за другом, и второй догоняет первый, также выходят за рамки стандартной (базовой) DBM. Описанные случаи разобраны, например, в работах [Rodkin и др., 2019; Temmer и др., 2011]. Такие события часто имеют повышенную

геоэффективность поэтому нельзя исключать их из рассмотрения при решении задач космической погоды. Предлагаемый в настоящей работе подход, представляет собой использование DBM модели в переменном солнечном ветре, и потенциально решает проблему моделирования взаимодействующих потоков.

1.3.3. Входные параметры модели

В таблице 1 представлены основные параметры, необходимые для моделирования KBM с помощью простой DBM (simple) и с помощью Advanced DBM, используемой для учета геометрии выброса.

модель	параметр	описание
simple + advanced	R_0	Начальная граница моделирования, обычно выбирается как 20 радиусов Солнца
simple + advanced	T_0	Время нахождения выброса на R_0
simple + advanced	v_0	Скорость в момент нахождения выброса на R_0
simple + advanced	w	Скорость фонового солнечного ветра на расстоянии R_0
simple + advanced	γ	Параметр аэродинамического сопротивления гамма
advanced	da	Угол раствора конуса KBM
advanced	φ	Угол между центральной точкой фронта KBM и направлением на Землю

Таблица 1. Входные параметры DBM simple и advanced версий.

Рассмотрим комбинации параметров модели, предлагаемые различными авторами на основе статистических исследований. Параметры выброса можно определить по данным коронографа, и свободными параметрами остаются – параметр аэродинамического сопротивления γ и скорость фонового ветра, которые нельзя определить из наблюдений, а лишь дать оценку из эмпирических, статистических либо модельных представлений.

В работе [Kay, Mays, Verbeke, 2020] проведено исследование моделирования КВМ с целью выявления входных параметров наиболее важных для моделирования. Авторами были рассмотрены события с различными характеристиками по массе, скорости, угловому раствору и другим параметрам. Каждому входному параметру присваивалась неопределенность, которая приводила к ошибкам прогнозирования. Таким образом, авторы проанализированы точность определения каких входных параметров наиболее сильно влияет на результат прогноза. Оказалось, что в среднем для всех выбросов наиболее важны именно скорость и угловой раствор КВМ, при чем для более мощных КВМ угол раствора конуса важнее. Направление распространения выброса так же важно, чтобы определить придет ли КВМ к Земле центральной частью фронта, флангом или не придет. Скорость фонового солнечного ветра не так важна для мощных выбросов, однако она начинает играть роль в случае слабых событий. Плотность фонового солнечного ветра сильнее влияет на быстрые КВМ. Однако это влияние не так велико, как влияние параметров самого выброса.

В работе [Vrsnak и др., 2010] также было исследовано влияние различных входных параметров на моделирование. Показано, что существует группа КВМ обладающих низкой массой, но протяженных в пространстве, для которых важную роль играет именно скорость фонового солнечного ветра. Такие выбросы сравниваются по скорости с фоновым ветром уже на близких к Солнцу расстояниях, и далее следуют вместе с фоновым ветром. Среднее время распространения до Земли для этих выбросов порядка 80ч, такая

тенденция была замечена еще в 1988 году [Brueskner и др., 1998]. С другой стороны, существуют массивные и узконаправленные события, которые в большей степени определяются начальной скоростью KBM. Именно такие события могут прийти к Земле в рекордно короткое время (порядка 1 день) и с высокой скоростью.

В работе [Vršnak и др., 2013] авторы анализируют различные комбинации параметров w и γ , и приходят к выводу, что для одномерной базовой DBM лучшие результаты дает комбинация $\gamma = 2 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}$ и $w = 400 \text{ км/с}$ для события 15.11.2007, а для события 12.12.2008 комбинация $\gamma = 2 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}$ и $w = 350 \text{ км/с}$.

1.3.4. Вариации модели

В работе [Dumbović и др., 2021] подробно описаны различные варианты, в которых может быть использована DBM: базовый одномерный вариант, двумерная Advanced DBM с различными вариантами конуса KBM (DBM+Cone model), а также варианты с примирением ансамблевого подхода (DBEM – Drag Based Ensemble Model). Все эти варианты доступны онлайн для запросов пользователей либо используются системами и организациями для научных и прогностических целей.

Идея конической геометрии KBM и её применения для прогнозирования предложена в работе [Xie, 2004], где автор предлагает моделировать форму KBM типа гало в виде конуса, параметры которого можно определить по снимкам коронографа. Применение этой идеи для двумерной DBM привело к развитию трех вариантов геометрии: модель концентрического конуса, модель само-подобного конуса, модель конуса с выравниванием фронта. Модель концентрического конуса предполагает одинаковое распространение всех точек фронта, и отличается от одномерной DBM тем, что учет конической геометрии позволяет судить о том, заденет ли KBM Землю, и если заденет, то какой частью. Остальные модели относятся уже к Advanced DBM, так как дают

возможность рассчитать поправку на время и скорость прихода KBM к Земле для каждой точки фронта. Обе модели предполагают запаздывание флангов относительно центральной части фронта, однако в модели с выравниванием фронта со временем это поправка становится незначительной и в пределе модель дает результат аналогичный концентрической. Степень отставания флангов определяется параметром аэродинамического сопротивления и разностью скоростей между фоновым ветром и скоростью KBM.

Ансамблевый (ensemble) подход к модели (DBEM), описанный в работе [Dumbović и др., 2018] может быть применен к любой модели, в которой присутствует неопределенность входных данных. Прогнозирование KBM, как раз относится к задачам такого рода, из-за ограниченного количества наблюдательных данных KBM на начальной стадии, и из-за недостатка наших знаний об условиях в межпланетной среде на пути распространения KBM. Ансамблевый подход позволяет учесть неопределенность входных параметров, путем создания множества возможных наборов входных параметров. Таким образом, можно определить допустимый разброс выходных параметров и вероятность реализации каждого сценария.

Наконец, отдельного упоминания достойна модель ElEvoHI, в основе которой лежит DBM, однако форма KBM аппроксимируется эллипсом, а входные данные берутся с прибора HI (Amerstorfer et al., 2021; Hinterreiter et al., 2021; Rollett et al., 2016).

1.3.5. Сравнение с другими моделями

В ряде работ проведено сравнение DBM в разных её вариациях с такими моделями как WSA-Enlil+Cone и другими. 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.

В работе [Riley и др., 2018] были проанализированы модели, принимающее участие в проекте CCMC CME Scoreboard. CCMC (Coordinating Community Modeling Center) – некоммерческая организация, занимавшая оценкой и анализом различных моделей, применяющихся в космической погоде. Проект CME Scoreboard отбирает KBM в режиме реального времени и предлагает желающим прислать свои предсказания до его регистрации на Земле. В статье авторы проанализировали все модели, участвующие в проекте с 2013 по 2018. Всего за это время 32 моделями было совершено порядка 500 прогнозов. В сводной таблице по всем моделям (Табл. 3. в работе Riley et al., 2018) видно, что результаты DBM сравнимы с другими моделями, однако набор данных именно по DBM не большой – всего 13 прогнозов.

Глава 2. Моделирование распространения КВМ по переменному фоновому ветру¹

В первой главе приводится описание моделей, используемых для моделирования распространения КВМ. Решается вопрос о выборе входных данных для моделирования. Приводится пример применения моделей для прогнозирования как отдельных событий в 2010–2011 годах, так и для моделирования скорости фонового ветра в 2010 году.

2.1. Модель квазистационарных потоков солнечного ветра (КСВ)

Прогнозирование квазистационарных потоков в гелиосфере – отдельная задача со своими особенностями. Одной из первых моделей, позволяющий оценить скорость солнечного ветра была модель, предложенная Паркером в 1965 году. Она получила название политропной и не учитывала магнитные силы и неадиабатичность течения. Попытки учесть вязкость и теплопроводность, и магнитное поле привели к созданию новых моделей.

В настоящем исследовании скорость солнечного ветра используется для характеристики межпланетной среды, через которую распространяется корональный выброс массы. Для моделирования фонового солнечного ветра применяется модель квазистационарных потоков солнечного ветра (КСВ) — эмпирический подход, устанавливающий зависимость между площадью корональных дыр (КД) и скоростью 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

¹ При написании данной главы использовались материалы публикации по теме диссертации 2, выполненных автором в соавторстве.

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:

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

где $S_i(t_{i0})$ – относительная площадь КД внутри выделяемой области в момент времени t_0 ; 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 определяются путём минимизации ошибки прогноза. Расчёт времени распространения солнечного ветра от солнечной короны до орбиты Земли (1 а.е.) осуществляется на основе баллистической модели, предполагающей равномерное радиальное движение потока. Результаты работы модели доступны на сайте http://swx.sinp.msu.ru/models/solar_wind.php?gcm=1

2.2.DBM с использованием переменного фонового ветра

В данной работе использовалась одномерная версия DBM. Основные входные параметры модели представлены в таблице 1 (см. simple). Значение начального расстояния R_0 выбирается исходя из условия, при котором параметры γ и w остаются постоянными в процессе распространения KBM, что упрощает численное решение задачи. В работе [Vršnak и др., 2013] показано, что правомерно выбрать $R_0 = 20R_{Sun}$, где R_{Sun} – радиус Солнца. Однако для очень быстрых выбросов допускается увеличение этого значения, поскольку на них в большей степени влияет сила Лоренца, прямо пропорциональная скорости плазмы.

Дополнительным допущением является предположение о постоянстве коэффициента γ . В реализации двумерной DBM модели [Dumbović и др., 2021] предлагается считать γ постоянным для каждого события и выбирать его значение, в зависимости от начальной скорости выброса v_0 по следующей формуле:

$$8 \quad \gamma = \begin{cases} 0.5 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}, & \text{при } v_0 < 500 \frac{\text{км}}{\text{с}} \\ 0.2 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}, & \text{при для } 500 \frac{\text{км}}{\text{с}} \leq v_0 < 1000 \frac{\text{км}}{\text{с}} \\ 0.1 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}, & \text{при } v_0 \geq 1000 \frac{\text{км}}{\text{с}} \end{cases}$$

Для нашего тестирования мы выбрали такие же значения для γ . Скорость фонового солнечного ветра w определялась на расстоянии $R_0 = 20R_{\text{Sun}}$ согласно модели КС. При этом для расчета площадей корональных дыр использовались изображения Солнца SDO/AIA на длине волны $193\text{\AA}$. Минимальная скорость СВ, которой заменяются периоды отсутствия КД была взята равной $V_{\text{min}} = 300 \text{ км/с}$.

2.3. Выбор входных данных для тестирования

Остальные входные параметры DBM модели: T_0 и v_0 можно получить из данных наблюдений солнечной короны коронографом. В данном исследовании использовались данные с коронографа LASCO KA SOHO, из баз CACTus (<http://sidc.oma.be/cactus/catalog.php>) и SEEDS (<http://spaceweather.gmu.edu/seeds/lasco.php>).

База данных CACTus (Computer Aided CME Tracking) представляет собой автоматизированную систему, предназначенную для выявления событий KBM по изображениям с коронографов LASCO C2/C3. Программа фиксирует дату и время обнаружения выброса, продолжительность события (в часах), направление распространения, угол раствора конуса в плоскости изображения, а также определяет фронтальную скорость, усреднённую по всем направлениям, её разброс, минимальные и максимальные значения.

Каждому событию присваивается индекс Гало (II, III или IV степень) в зависимости от угла раствора [Robbrecht, Berghmans, 2004]. База обновляется в реальном времени каждые 6 часов.

База данных SEEDS включает два каталога: один содержит список KBM, зафиксированных коронографом LASCO C2, а два других — события, обнаруженные на изображениях с коронографов SECCHI COR2, установленных на космических аппаратах STEREO A и B. В рамках настоящей работы представляет интерес первый каталог. SEEDS, как и CACTus, является автоматизированной системой обработки изображений, предназначенной для выявления KBM и определения их параметров. Среди регистрируемых характеристик — время обнаружения события, направление его распространения, угол раствора конуса KBM в плоскости изображения, а также скорость, вычисляемая путём линейной аппроксимации движения фронта. При наличии не менее трёх кадров события дополнительно оценивается ускорение, полученное с помощью квадратичной аппроксимации траектории KBM [Olmedo и др., 2008].

В рамках настоящей работы одной из исследованных задач стала оценка выбора базы данных, обеспечивающей наилучшее качество прогноза при использовании модели DBM на заданном временном интервале. Это обусловлено значительными расхождениями интересующих параметров для одного и того же события в различных базах. Параметры T_0 и v_0 необходимо к тому же пересчитать на расстояние $R_0 = 20R_{\text{Sun}}$, так как время T_0 , указанное в базах данных — это время детектирования KBM в поле зрения коронографа LASCO C2. Пересчёт осуществлялся при предположении равномерного движения KBM, что не всегда корректно. Однако в базе SEEDS приведены значения ускорения KBM, рассчитанные по коронографическим снимкам, что позволило провести пересчёт с учётом равноускоренного движения. В результате были сформированы три варианта наборов входных параметров T_0

и v_0 и γ : 1 – по базе CACTus (пересчет на $20R_{\text{Sun}}$ в приближении равномерного движения), 2 – по базе SEEDS (пересчет на $20R_{\text{Sun}}$ в приближении равномерного движения) и 3 – по базе SEEDS (SEEDS_асс; пересчет на $20R_{\text{Sun}}$ в приближении равноускоренного движения, где это было возможно (23 события из 26); иначе – пересчет в приближении равномерного движения). Параметр γ выбирался согласно формуле 8. Коэффициенты для расчета скорости фонового ветра были подобраны для длины волны $193\text{\AA}$ путем минимизации ошибок прогнозирования на данных за 2010-2011 гг.: $A_i = 210$ и $\alpha_i = 0.4$.

2.4. Результаты прогноза прихода КВМ в 2010-2011 гг.

Для тестирования модели был выбран временной интервал с мая 2010 года по декабрь 2011 года. Выбор обусловлен тем, что начиная с мая 2010 года стали доступны данные с солнечной обсерватории SDO, которые используются в данной работе для прогноза скоростей квазистационарных потоков солнечного ветра.

В данной работе исследовались исторические события, для которых было известно, что они были зарегистрированы у Земли, для этого были использованы каталоги МКВМ Richardson&Cane [Cane, Richardson, 2003] и GMU CME List [Hess, Zhang, 2017]. В этих базах события МКВМ идентифицируются по ключевым параметрам солнечного ветра, таким как плотность, скорость, температура протонов и ионные соотношения, определяемым по данным спутника ACE. Методология построения подобных каталогов подробно описана в работе Richardson и соавт. [Richardson, Cane, 2012]. Каталоги содержат информацию о времени начала событий (в случае Richardson & Cane учитывалось именно время прихода тела МКВМ, а не ударной волны), их длительности, а также средних и максимальных скоростях. Эти параметры использовались при валидации модели.

В качестве тестовой выборки были отобраны те случаи МКВМ, для которых удалось установить связь с соответствующими КВМ. События с неопределённым источником исключались из анализа. В результате, за указанный период было отобрано 22 события из каталога Richardson & Cane и 15 — из GMU CME List. С учётом дублирующихся событий и исключением выброса в сентябре 2010 года (из-за отсутствия данных LASCO), всего было проанализировано 26 событий. Их параметры приведены в таблице 2.

В выборке присутствуют как одиночные, так и сложные (множественные) случаи. Например, события №1 и №2 имели разные источники на Солнце, однако прибыли к околоземной орбите одновременно и были зарегистрированы в каталогах как один МКВМ. Для каждого случая в каталогах также указывалось время наблюдения КВМ в коронографах (LASCO или STEREO).

В рамках данной работы рассматривались исторические случаи КВМ, достоверно зарегистрированных в околоземном пространстве. Однако в условиях оперативного прогнозирования требуется не только предсказать параметры прибытия выброса, но и сам факт его прихода к Земле. Одним из возможных подходов к решению этой задачи является использование информации о корональных диммингах — резких локальных снижениях плотности вещества в солнечной атмосфере, сопровождающих процесс формирования КВМ. Эти области проявляются как участки пониженной яркости в линии 21,1 нм, регистрируемой инструментом AIA на борту спутника SDO.

Онлайн-база данных Solar Demon [Kraaikamp, Verbeeck, 2015] предоставляет в реальном времени сведения о солнечных вспышках и диммингах. Использование этой базы позволяет, в частности, исключать события, направленные от Земли, если соответствующий димминг наблюдается за

лимбом, а не на диске. Кроме того, наличие димминга даёт информацию о координатах предполагаемого источника выброса.

Одной из задач настоящего исследования являлась проверка гипотезы о возможности использования факта регистрации димминга в качестве индикатора прибытия КВМ к Земле. Для каждого случая МКВМ проводился поиск соответствующего димминга в базе Solar Demon.

Всего было исследовано 26 событий (для набора 1 – 25 событий, так как в базе CACTus отсутствовали данные за 23.12.2010), для каждого из которых использовалось три набора входных данных, с различными T_0 , v_0 и γ и одинаковыми R_0 и w . Данные этих событий приведены в таблице 2.

№	Параметры МКВМ			Параметры КВМ по CACTus		Параметры КВМ по SEEDS			Solar Demon
	$T_{\text{начала}}$	$T_{\text{конца}}$	$\langle V \rangle$	$T_{\text{начала}}$	V	$T_{\text{начала}}$	V	a	$T_{\text{начала}}$
	ДД.ММ.ГГ ЧЧ.ММ	ДД.ММ.ГГ ЧЧ.ММ	км/с	ДД.ММ.ГГ ЧЧ.ММ	км/с	ДД.ММ.ГГ ЧЧ.ММ	км/с	м/с ²	ДД.ММ.ГГ ЧЧ.ММ
1	28.05.10	29.5.10	360	23.5.10	240	23.5.10	229	33.5	23.5.10
	19.00	17.00		17.06		18.30			16.42
2	28.5.10	29.5.10	360	24.5.10	381	24.5.10	309	2.7	24.5.10
	19.00	17.00		13.54		14.30			13.24
3	21.6.10	22.6.10	360	16.6.10	339	16.6.10	287	5.2	16.6.10
	6.00	14.00		4.06		4.06			3.00
4	31.10.10	1.11.10	350	26.10.10	349	26.10.10	38	7.0	---
	5.00	21.00		11.36		0.36			
5	28.12.10	28.12.10	350	---	---	23.12.10	152	6.6	---

	3.00	15.00				5.12			
6	18.2.11 19.00	20.2.11 8.00	470	15.2.11 2.24	469	15.2.11 2.36	505	70.8	15.2.11 1.42
7	6.3.11 9.00	8.3.11 6.00	430	3.3.11 6.12	228	3.3.11 6.36	188	-0.5	---
8	29.3.11 23.00	31.3.11 4.00	360	25.3.11 7.48	325	25.3.11 5.36	123	4.3	---
9	28.5.11 5.00	28.5.11 21.00	510	25.5.11 5.48	134	25.5.11 5.48	290	-14.9	25.5.11 4.10
10	5.6.11 2.00	5.6.11 19.00	510	2.6.11 8.12	422	2.6.11 9.00	91	127.3	2.6.11 7.46
11	17.6.11 5.00	17.6.11 13.00	500	14.6.11 7.12	456	14.6.11 6.00	180	19.2	---
12*	3.7.11 3.00	4.7.11 15.00	396	29.6.11 0.48	459	29.6.11 1.25	509	-48.1	29.6.11 0.22
13	5.8.11 5.00	5.8.11 14.00	430	2.8.11 6.36	508	2.8.11 6.48	613	33.7	2.8.11 5.36
14	6.8.11 22.00	7.8.11 22.00	540	4.8.11 4.12	868	4.8.11 3.48	384	22.2	4.8.11 3.52
15	10.9.11 3.00	10.9.11 15.00	470	7.9.11 6.12	419	7.9.11 1.36	226	28.9	6.9.11 22.20
16	17.9.11 14.00	18.9.11 6.00	430	14.9.11 0.36	663	14.9.11 0.00	295	-2.3	---

17	22.9.11 15.00	23.9.11 3.00	390	19.9.11 9.12	358	19.9.11 9.12	366	6.0	18.9.11 23.50
18	26.9.11 20.00	28.9.11 15.00	580	24.9.11 13.25	941	24.9.11 12.36	920	312.0	24.9.11 12.20
19	6.10.11 10.00	6.10.11 22.00	450	2.10.11 1.25	578	2.10.11 5.00	193	25.6	2.10.11 0.10
20*	8.10.11 14.00	9.10.11 10.00	328	3.10.11 1.36	428	3.10.11 0.48	251	16.2	2.10.11 21.44
21	22.10.11 21.00	23.10.11 16.00	290	16.10.11 14.24	216	16.10.11 12.24	121	6.2	16.10.11 11.12
22	24.10.11 22.00	25.10.11 16.00	460	22.10.11 11.00	694	22.10.11 10.36	619	40.8	22.10.11 10.02
23	2.11.11 1.00	3.11.11 4.00	380	27.10.11 11.48	522	27.10.11 10.12	181	-5.9	---
24	13.11.11 10.00	15.11.11 2.00	370	9.11.11 13.48	721	9.11.11 13.36	649	53.0	9.11.11 12.56
25	29.11.11 0.00	29.11.11 8.00	450	26.11.11 7.12	672	26.11.11 7.00	623	16.6	26.11.11 6.32
26	29.12.11 22.00	30.12.11 9.00	400	26.12.11 11.48	578	26.12.11 12.00	213	31.4	26.12.11 11.10

Таблица 2. Параметры отобранных для исследования МКВМ из каталогов и параметры связанных с ними КВМ по базам данных CACTus и SEEDS. В последней колонке указано время начало ассоциированного с КВМ димминга из БД Solar Demon.

Скорости КВМ на расстоянии $R_0 = 20R_{\text{Sun}}$, по наборам 1, 2, 3 представлены на рисунке (Рисунок 2.1). Как видно из рисунка, значения скоростей КВМ существенно варьируются в зависимости от выбранной базы данных и применённого метода пересчёта на расстояние R_0 . Особенно заметны отличия между результатами пересчёта параметров базы SEEDS с учётом ускорения и без него (например, для событий № 6, 10, 18 и других). В дальнейшем будет проанализировано, использование данных какой базы и метода пересчёта обеспечивает прогнозы, наиболее соответствующие параметрам из каталога МКВМ за 2010–2011 годы.

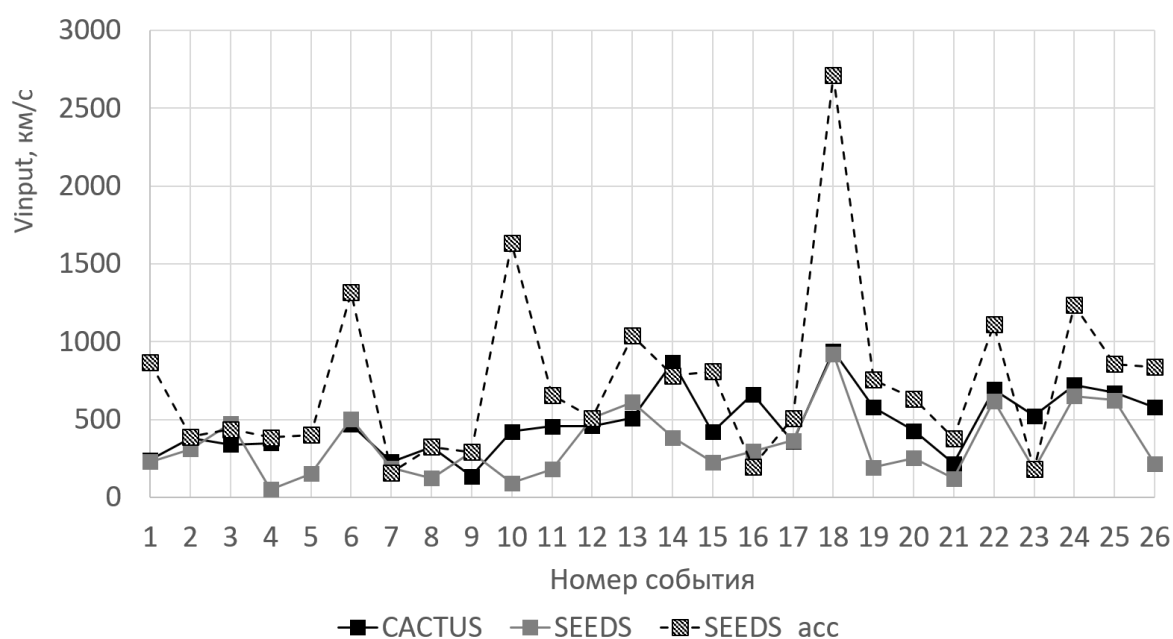


Рисунок 2.1. Скорости КВМ на расстоянии R_0 , равное 20 солнечным радиусам, для событий из таблицы 2, пересчитанные различными способами по трем наборам из баз данных: CACTus и SEEDS – пересчет без ускорения, SEEDS_acc – с ускорением.

В процессе моделирования распространения КВМ для каждого события были построены функции зависимости расстояния $R(t)$ и скорости $v(t)$ от времени, а также определены время и скорость прибытия МКВМ на орбиту Земли (1 а.е.). Полученные значения сопоставлялись с параметрами из соответствующих каталогов, а после рассчитывалась ошибка прогноза времени и скорости прихода КВМ соответственно по формулам:

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

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

На рисунке (Рисунок 2.2) показаны зависимости $R(t)$ и $v(t)$, для события в ноябре 2011 года (события №25 в таблице 2). Из этих зависимостей можно найти время прихода МКВМ на расстояние в 1 а.е. и его скорость в этот момент.

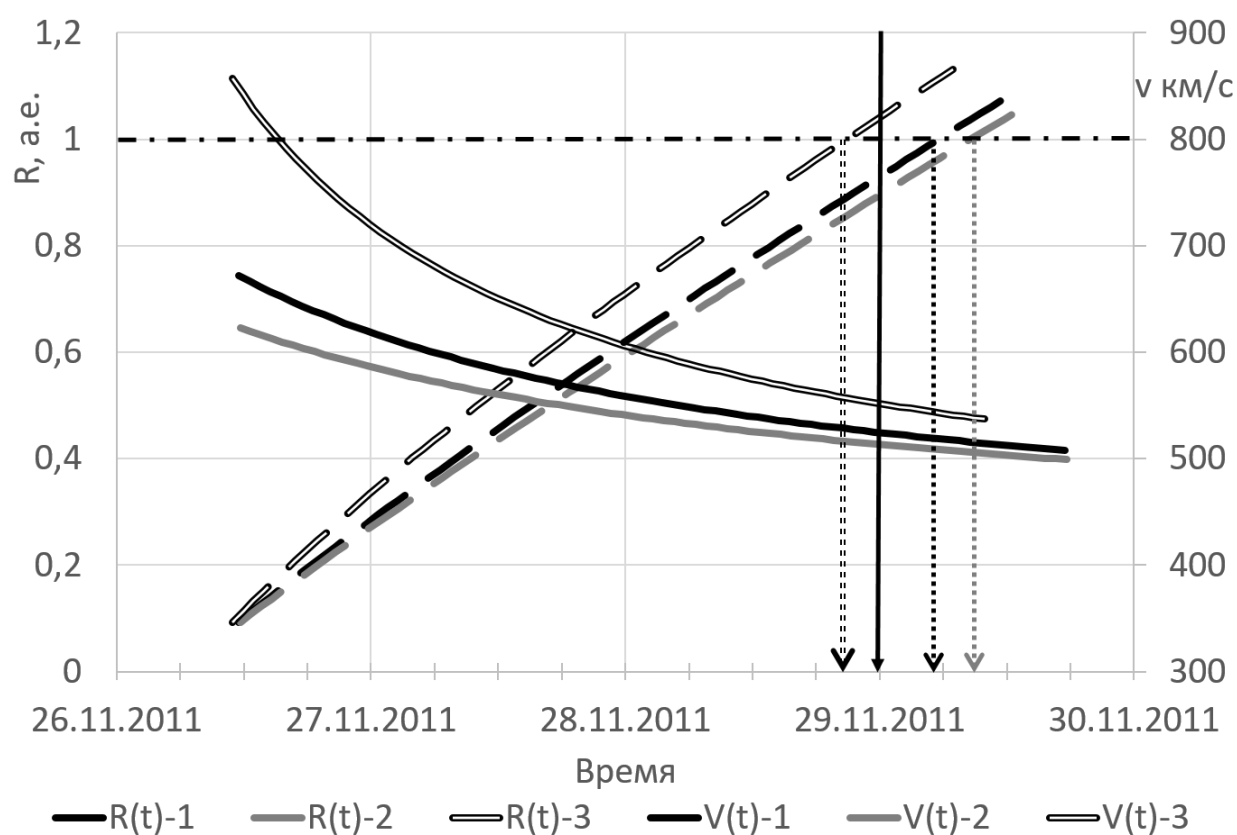


Рисунок 2.2. Зависимости расстояния (штриховая), пройденного КВМ, и его скорости (сплошная) от времени в согласно DBM модели, посчитанные для трех наборов входных данных: $R(t)$ -1 и $V(t)$ -1 – CACTus, $R(t)$ -2 и $V(t)$ -2 – SEEDS, $R(t)$ -3 и $V(t)$ -3 – SEEDS_асс. Черным горизонтальным штрих-пунктиром отмечено расстояние 1 а.е., вертикальными пунктирами указано время прихода КВМ на 1 а.е. для каждого набора данных. Вертикальная черная линия указывает время прихода МКВМ по каталогу Richardson&Cane.

В таблице 3 приведен пример входных параметров и результатов моделирования для события №25 из таблицы 2.

Можно заметить, что 1 и 2 наборы дают близкие результаты, при этом разница во времени прихода КВМ составляет около 3 часов, что связано с изначальным различием скоростей примерно на 50 км/с. Благодаря особенностям модели DBM эта разница в скоростях сглаживается, так как скорость КВМ стремится к скорости фонового солнечного ветра, которая в рассматриваемом случае равна 400 км/с. В итоге прогнозируемые скорости отличаются всего на 15 км/с. В то же время третий набор данных демонстрирует значительно иные результаты, что объясняется учётом ускоренного движения КВМ при расчётах на расстоянии до 20 радиусов Солнца.

№	коронограф			DBM-входные параметры					DBM-выходные параметры	
набор	$T_{кор}$, ДД. ЧЧ:ММ	$v_{кор}$, км/ с	$a_{кор}$, км/с ²	R_0 , R_{Sun}	T_0 , ДД ЧЧ:ММ	v_0 , км/с	$\gamma \cdot 10^7$, км ⁻¹	w , км/ с	$T_{прогноз}$, ДД ЧЧ:ММ	$v_{прогноз}$, км/с
1	26. 07:12	672	-	20	26. 11:30	672	-0.2	400	29 05:30	519
2	26. 07:00	623	-		26. 11:39	623	-0.2		29 08:39	506
3						16.6	26. 10:54		857	-0.2
Время прихода МКВМ и его средняя скорость на орбите Земли по каталогу Ричардсона и Кейна:									29 00:00	450

Таблица 3.Пример результата моделирования прихода к Земле события №25 из таблицы 2 для каждого набора входных данных.

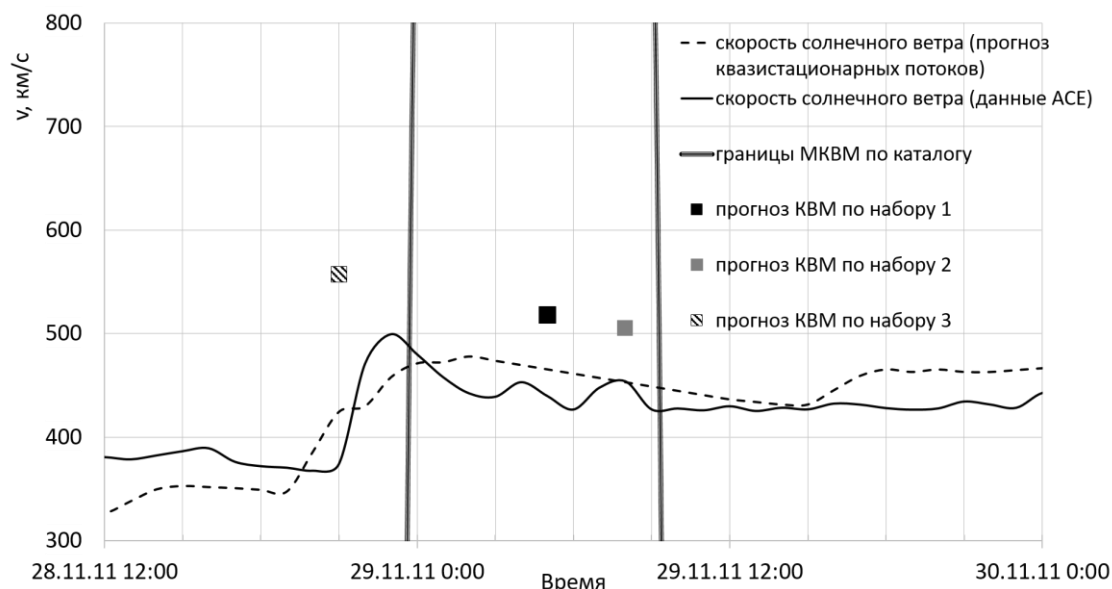


Рисунок 2.3. Результат моделирования события № 25. Границы МКВМ, соответствующие данным каталога Richardson&Cane, указаны вертикальными линиями. Скорость солнечного ветра по данным ACE – черная кривая, спрогнозированная по модели квазистационарных потоков солнечного ветра скорость – пунктирная черная линия.

Это же событие проиллюстрировано на рисунке (Рисунок 2.3), где изображены также наблюдаемая на КА ACE скорость солнечного ветра и прогнозируемая скорость квазистационарного ветра. Согласно каталогу Richardson&Cane, МКВМ, соответствующий исследуемому КВМ, был зарегистрирован в точке L1 29 ноября 2011 года в 00:00. При этом прогнозируемое время прихода, рассчитанное на основе первых двух наборов данных (CACTus и SEEDS), запаздывало относительно фактического времени, тогда как прогноз по третьему набору (SEEDS_асс) предсказывал приход с небольшим опережением. Средняя и максимальная скорости МКВМ в каталоге составляли 450 км/с и 510 км/с соответственно. Прогнозируемые скорости для наборов 1, 2 и 3 равнялись 519, 506 и 557 км/с, что достаточно близко к наблюдаемым

значениям, особенно для первых двух наборов.

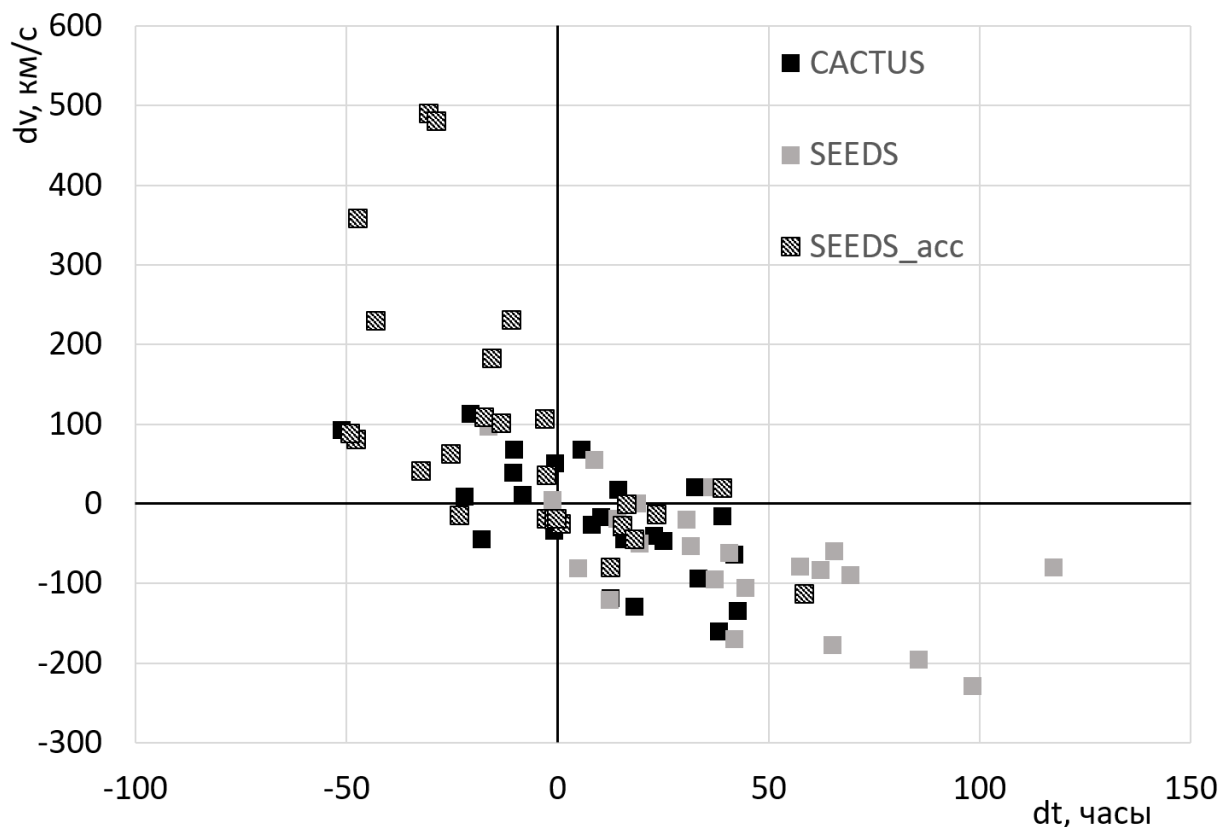


Рисунок 2.4. Ошибки прогнозирования времени прихода и скорости МКВМ (dt и dv), полученные при моделировании распространения КВМ для входных параметров модели из разных баз данных, для событий из таблицы 2.

Анализируя все 26 событий, мы получили распределения ошибок прогнозирования по скорости (dv) и времени (dt), рассчитанные по формулам 9 и 10 для каждого из трёх наборов входных данных. Эти распределения представлены на Рисунок 2.4. Оценка ошибок показала, что второй набор данных характеризуется занижением прогнозируемой скорости и задержкой во времени прихода МКВМ. Напротив, использование третьего набора приводит к значительному завышению скорости и, как следствие, опережению по времени. Наименьший разброс ошибок демонстрирует первый набор входных данных. Такая разница объясняется методами определения скорости КВМ в базах данных CACTus и SEEDS. В CACTus (набор 1) вычисляется средняя скорость выброса, усреднённая по всем направлениям, тогда как в SEEDS (наборы 2 и 3) определяется начальная скорость и ускорение фронта

КВМ на основе аппроксимации его движения линейной и квадратичной функциями соответственно. Наше исследование показывает, что модель DBM, использующая скорость КВМ на 20 радиусах Солнца, рассчитанную из начальной скорости и ускорения, полученных автоматическим анализом снимков LASCO C2 из базы SEEDS, приводит к значительному числу случаев, когда прогнозируемая скорость превышает измеренную более чем на 200 км/с. В то же время игнорирование ускорения ухудшает качество прогноза по времени прихода КВМ, приводя к задержкам более 50 часов в некоторых событиях.

Разброс ошибок прогнозирования времени прихода МКВМ представлен на гистограммах (Рисунок 2.5). Результаты аппроксимации разницы между измеренными и прогнозируемыми значениями времени прихода МКВМ нормальным распределением приведены в таблице 4. Аппроксимация показывает лучшие результаты для набора данных CACTus, что подтверждается значением коэффициента детерминации R^2 , близким к единице: 0,99 для CACTus, 0,96 для SEEDS и 0,95 для SEEDS_{асс}.

При использовании равноускоренного приближения для пересчёта параметров КВМ из базы SEEDS на расстояние 20 солнечных радиусов медиана ошибки dt смещена относительно нуля на -9 часов. Модуль средней ошибки $\langle dt \rangle$ в этом случае в 1,1 раза меньше, а разброс ошибок dt — в 1,3 раза больше, чем при прогнозе на основе данных CACTus. Для набора SEEDS без учёта ускорения медиана ошибки смещена на +37 часов, модуль средней ошибки $\langle dt \rangle$ в 4 раза больше, а разброс ошибок dt — в 1,6 раза выше по сравнению с CACTus.

Медиана распределения ошибок dt , полученного на основе данных CACTus, смещена на +14 часов, а средняя ошибка $\langle dt \rangle$ составляет +9,24 часа. Модуль средней ошибки определения скорости КВМ $\langle dv \rangle$ при прогнозировании на

основе данных CACTus равен 20 км/с — это в 3 раза лучше результата прогноза на основе SEEDS и в 4,3 раза превосходит результат SEEDS_асс.

	набор 1 CACTus	набор 2 SEEDS	набор 3 SEEDS_асс
R2	0.99	0.96	0.95
СКО	0.37	0.59	0.69
медиана, ч	14.3	37.4	-9.2
ШПВ, ч	58	91	72

Таблица 4. Параметры аппроксимации гистограмм распределения ошибок определения времени прихода МКВМ функцией Гаусса. ШПВ - ширина распределения на половине высоты

Выявленная тенденция «запоздалого прогноза» при использовании базы CACTus (медиана распределения $dt = +14$ ч, средняя ошибка $\langle dt \rangle = +9,24$ ч) может быть связана с совокупностью факторов: особенностями работы автоматизированной системы CACTus, погрешностями в оценке скорости квазистационарных потоков, неполным учётом взаимодействий в гелиосфере (в модели учитывается взаимодействие КВМ–ВСП только на расстоянии 20 солнечных радиусов, а взаимодействие КВМ–КВМ не рассматривается), а также с пренебрежением формой и направлением выброса. Учет и анализ этих факторов требует отдельного исследования. В настоящей работе дальнейшее моделирование (в Главах 4 и 5) выполнялось с использованием данных базы CACTus (набор 1).

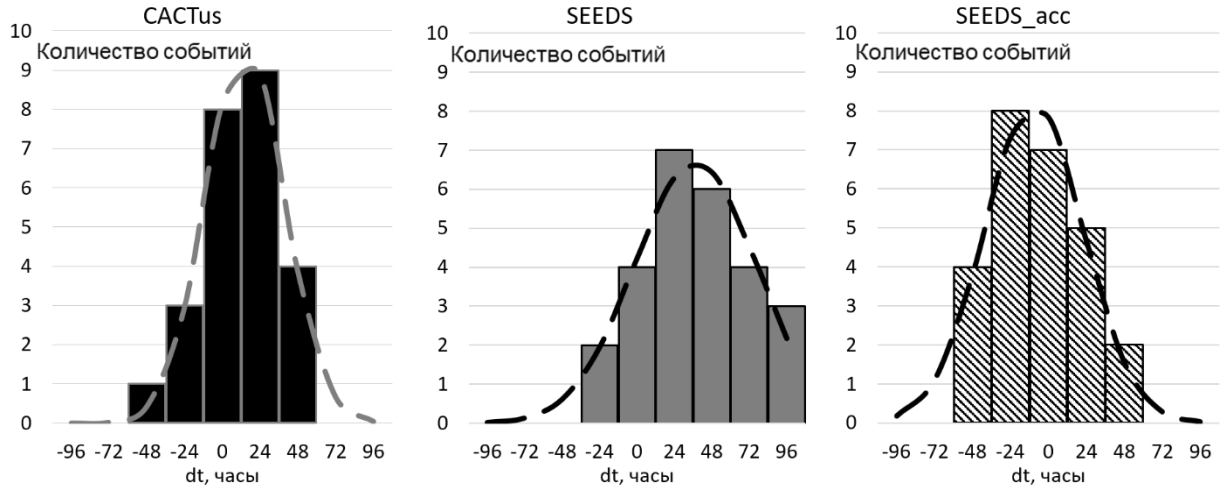


Рисунок 2.5. Гистограммы распределения отклонений (dt) между наблюдаемым и рассчитанным временем прихода МКВМ на околоземную орбиту при использовании различных наборов входных параметров из баз данных SEEDS и CACTus. Пунктирная линия соответствует аппроксимации распределений функцией Гаусса.

В рамках настоящего исследования DBM-модель показала среднюю ошибку прогнозирования времени прихода КВМ, усреднённую по трём наборам входных данных, равную 18 ч. Хотя это значение является достаточно большим, оно сопоставимо с погрешностями, полученными при применении других моделей (см. Таблица 5). Для сопоставления результатов моделирования с данными, приведёнными в работах [Dumbović и др., 2018; Riley и др., 2018; Suresh и др., 2019], были рассчитаны следующие показатели ошибок прогноза:

$$11 \quad \langle dt \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dt_i ,$$

$$12 \quad \text{std} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |dt_i - \langle dt \rangle|^2} ,$$

$$13 \quad \text{ср. абс. ошибка (CAO)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |dt_i - \langle dt \rangle| ,$$

где t_i – это разность между прогнозируемым временем прихода МКВМ и значениями из каталогов МКВМ для i -го события, N – количество анализируемых событий.

В работе [Riley и др., 2018] представлен анализ прогнозов за 2013–2018 гг., выполненных различными исследовательскими группами с применением различных моделей в режиме онлайн. Сравнение этих результатов для моделей WSA-ENLIL+Cone и DBM с нашими данными приведено в таблице 5. В этой же таблице приведено сопоставление наших результатов с данными работы [Dumbović и др., 2018], где рассматривались 25 событий 2013–2014 гг., из которых девять KBM, зафиксированных коронографом, не достигли Земли, что позволило оценить точность прогноза лишь для 16 событий. Несмотря на различие временных интервалов, эти работы представляют интерес, поскольку описывают прогнозы в режиме реального времени [Riley и др., 2018], или с использованием варианта DBM модели [Dumbović и др., 2018]. В последней работе также приведены ошибки прогнозирования скорости MKBM: разброс ошибок в нашей модели оказался меньше, при этом средняя ошибка составила 150 км/с против 160 км/с в [Dumbović и др., 2018].

	1	2	3	WSA- ENLIL +Cone (GSFC) ¹	WSA- ENLIL +Cone (NOAA) ¹	DBM ¹	DBEM ²	DBM ³
$dt_{\max}$, ч	42.6	117	58.3	48	39.2	15.5	10.2	41.1
$dt_{\min}$, ч	-51.1	-17.4	-49.1	-41.2	-23.5	-20.9	-24.9	-29.5
$\langle dt \rangle$, ч	9.24	36.43	-8.15	4.89	1.27	-4.16	-9.7	-1.94

¹ Данные из работы [Riley и др., 2018]

² Данные из работы [Dumbović и др., 2018]

³ Данные из работы [Suresh и др., 2019]

std., ч	23.5	33.3	27.8	18	15.5	9.5	16.7	16.3
CAO, ч	18.5	26.6	22.3	14,5	13.1	8,3	14.3	12.5
$dv_{\max}$, км/с	113	109	490	---	---	---	539	---
$dv_{\min}$, км/с	-160	-228	-122	---	---	---	-150	---
$\langle dv \rangle$, км/с	-20	-57	87	---	---	---	84	---
КОЛ-ВО СОБЫТИЙ	25	26	26	114	78	13	16	27

Таблица 5. Сравнение качества полученных прогнозов, рассчитанных для разных наборов входных данных, с результатами прогнозов, сделанных с помощью различных моделей, описанных в работах [Dumbović и др., 2018; Riley и др., 2018; Suresh и др., 2019]. В таблице $dt_{\max}$ (ч) – максимальная и $dt_{\min}$ (ч) – минимальная разность между наблюдением и прогнозом времени прихода МКВМ, $\langle dt \rangle$ (ч) – среднее отклонение, std. (ч) – стандартное отклонение и CAO (ч) – средняя абсолютная ошибка прогнозируемого время прихода МКВМ от наблюдаемого, $dv_{\max}$ (км/с) – максимальная и $dv_{\min}$ (км/с) – минимальная разность между наблюдаемым значением скорости МКВМ и прогнозируемым, $\langle dv \rangle$ (км/с) – среднее отклонение наблюдаемой скорости МКВМ от прогнозируемых значений.

В работе [Suresh и др., 2019] было рассмотрено 27 событий, произошедших в 2010–2013 гг. Отбор проводился по скорости КВМ и углу раствора конуса, в котором выброс наблюдался в коронографе. При этом исключались случаи множественных КВМ, а также события, пришедшиеся на периоды отсутствия данных по плазме солнечного ветра с КА ACE. Как видно из сравнения различных моделей (Таблица 5), результаты, полученные в нашей работе, несколько уступают данным [Suresh и др., 2019]. Значение $dt_{\min}$ оказалось хуже в основном из-за прогноза более раннего прихода лишь одного МКВМ (Рисунок 2.5). Если исключить это событие (№ 23 в таблице 2), то $dt_{\min}$ составит –22 ч, что уже лучше, чем в работе [Suresh и др., 2019]. Другие ошибки, полученные в нашем прогнозе, сравнимы с ошибками из работы [Suresh и др., 2019], учитывая, что мы не выполняли отбор событий по

входным параметрам и не исключали множественные КВМ, кинетические характеристики и время распространения которых могут значительно изменяться вследствие взаимодействий [Rodkin и др., 2018]. Стандартное отклонение 22.5 и 16.3 ч, а средняя абсолютная ошибка 17.8 и 12.5 ч, соответственно в нашем исследовании и в работе [Suresh и др., 2019]. Если не учитывать событие № 23 с неудачным прогнозом, стандартное отклонение и средняя абсолютная ошибка уменьшатся до 20,2 и 16,5 ч соответственно, а средняя ошибка прогноза изменится с 9,24 до 11,8 ч.

2.5. Обсуждение результатов

В работе проведён анализ возможности интеграции модели квазистационарных потоков солнечного ветра, разработанной в Центре прогноза космической погоды НИИЯФ МГУ, с моделью прогноза скорости и времени прихода межпланетных корональных выбросов массы (МКВМ) на околоземную орбиту. В качестве модели распространения КВМ использована простая Drag-Based Model (DBM), основанная на описании взаимодействия выброса с окружающим солнечным ветром.

Прогноз выполнялся на основе параметров КВМ, полученных из баз данных CACTus и SEEDS, для событий из каталогов Richardson & Cane и GMU CME List за 2010–2011 гг., соответствующих фазе роста 24-го солнечного цикла.

Сравнение результатов прогнозирования времени прихода и скорости МКВМ с фактическими данными показало, что использование параметров из базы CACTus в качестве входных данных DBM в среднем обеспечивает меньшие ошибки прогноза. Наилучшие статистические характеристики продемонстрировал набор 1 (CACTus): гистограмма отклонений времени прихода МКВМ от прогноза лучше всего аппроксимируется нормальным распределением (максимальный коэффициент детерминации R^2 , минимальная

среднеквадратичная ошибка), медианное значение составляет 14,2 ч, а ширина распределения на половине высоты — 58 ч. Для набора 3 (SEEDS_асс) медианное значение ближе к нулю (–9 ч), однако распределение более пологое, с шириной 73 ч. Набор 2 (SEEDS без учёта ускорения) показал наихудшие параметры аппроксимации: медиана значительно удалена от нуля, а ширина на половине высоты в 1,6 раза превышает показатель набора 1.

Полученные на основе базы CACTus ошибки прогнозирования сопоставимы с результатами других моделей, выполненных без привлечения данных КА STEREO, использование которых в 2010–2012 гг. позволяло значительно повышать точность прогноза за счёт стереонаблюдений KBM.

В дальнейшем планируется расширить анализ на весь 24-й солнечный цикл, разработать алгоритм, позволяющий отбирать события для прогнозирования из БД CACTus, и увеличить роль модельной скорости фонового ветра – учитывать высокоскоростные потоки не только в начальной точке моделирования, но и в нескольких точках по мере распространения KBM от Солнца к Земле.

Глава 3. Объединенный каталог МКВМ для верификации прогноза¹

Во второй главе подробно обсуждается вопрос верификации модели. Для тестирования модели на большом объеме данных необходимо провести оценку прогнозирования прихода КВМ на околоземную орбиту. Для реализации такой оценки спрогнозированное время прихода сравнивается с наблюдаемым временем регистрации МКВМ на околоземной орбите. Однако, определение точного времени прихода МКВМ по данным *in situ* зачастую представляет собой сложную задачу. Обычно исследователи используют уже существующие каталоги регистрации МКВМ на орбите Земли, либо применяют экспертную оценку для каждого конкретного случая.

Эта часть работы посвящена обзору на применяемые в настоящей работе каталоги МКВМ. Предложен алгоритм объединения каталогов, и проведен его анализ для периода 2010–2023 годы.

3.1. Каталоги МКВМ

Межпланетные корональные выбросы массы – спорадические потоки в солнечном ветре, характеризующиеся особыми параметрами плазмы и магнитного поля. МКВМ часто делят на две группы – намагниченные, с большим по модулю и монотонным вектором магнитного поля (так называемые магнитные облака - МО), и немагнитные – *ejecta*. Также МКВМ отличается характерной внутренней структурой. В мощных МКВМ можно выделить ударную волну, область сжатия (*sheath*), и само тело выброса (МО или *ejecta*). Подробные обзоры на МКВМ можно найти в работах [Cane,

¹ При написании данной главы использовались материалы публикаций по теме диссертации 3, 4, 6, выполненных автором в соавторстве.

Richardson, 2003; Gosling, 1990; Jian и др., 2006; Lepping, Jones, Burlaga, 1990; Wimmer-Schweingruber и др., 2006].

3.1.1. Каталог межпланетных корональных выбросов массы Ричардсона и Кейн

В работе [Cane, Richardson, 2003] описан каталог Ричардсона и Кейн (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.html>), который содержит данные с 1996 года. Каталог создается вручную, при определении временных границ МКВМ авторы руководствуются признаками МКВМ которые они, как эксперты, считают достаточными для выделения МКВМ. Для каждого события определена такая информация как время регистрации ударной волны (T_{shock}), время начала и окончания регистрации тела МКВМ (T_{start} , T_{end}). Если параметры плазмы удовлетворяют полностью или частично критериям, по которым выделяется магнитное облако, авторы помечают событие как «МС» или «poor МС» соответственно. Данные по каждому событию также дополнены информации о средней и максимальной скорости солнечного ветра за период регистрации выброса, средней величине межпланетного магнитного поля (ММП), минимальным значением Dst индекса. Для части событий указывается время наблюдения ассоциированного КВМ в короне Солнца (T_{source}). Поиск источников МКВМ производится с помощью коронографа LASCO КА SOHO или коронографов КА STEREO авторами каталога, а также с использованием информации из статьи [Wood и др., 2017], базы данных DONKI (<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/>) и др. Для выделения МКВМ в потоке солнечного ветра в каталоге Ричардсона и Кейн [Cane, Richardson, 2003] были использованы следующие признаки МКВМ:

- изменение отношения наблюдаемой температуры протонов к ожидаемой температуре солнечного ветра;
- уменьшенные флуктуации и монотонность магнитного поля;

- присутствие межпланетных ударных волн;
- присутствие двунаправленных потоков электронов (BDE).

3.1.2. Система CCMC CME Scoreboard

В 2013 году общественный центр координированного моделирования (CCMC) НАСА разработал веб-форму для подачи заявок, чтобы исследователи сообщества и оперативные прогнозисты представили свой прогноз времени прихода ударной волны, вызванной KBM, и величины Кр-индекса, если модель способна прогнозировать геомагнитную обстановку. Эта платформа получила название CVMC CME Scoreboard. Основная идея заключается в том, что после того, как на Солнце будет идентифицирован новый KBM, пользователи будут представлять свой прогноз в режиме реального времени (или как можно быстрее, поскольку время подачи прогноза также отслеживается). Кроме того, прогнозы доступны сообществу, опять же в режиме реального времени, что позволяет пользователям и сообществу в целом просматривать прогнозы по мере их поступления.

Табло прогнозов KBM (CME Scoreboard) является базой, в которой сохраняются результаты прогнозов, выполненных разными группами ученых. Целями работ [Riley и др., 2018; Verbeke и др., 2019] были (1) оценить текущее состояние прогнозов времени прибытия и воздействия KBM; (2) установить показатели, согласованные с сообществом; и (3) обеспечить эталон, по которому будущие модели и усовершенствования моделей могут оцениваться.

В настоящей работе используется время регистрации коронального источника (T_{source}) для тех событий, которые в последствии были зарегистрированы у Земли, а также время прибытия ударной волны от этого источника (T_{shock}). События определяются экспертами группы CCMC или берутся из базы DONKI.

Случаи, в которых наблюдались различные корональные источники с одинаковым время прихода на к орбите Земли, учитывались нами как один

МКВМ с одним основным источником (более ранним) и дополнительным, указываемым в отдельной колонке T_{source}^* .

3.1.3. Каталог крупномасштабных типов солнечного ветра ИКИ РАН

Каталог крупномасштабных событий солнечного ветра ИКИ РАН (<http://www.iki.rssi.ru/omni/catalog/>) содержит информацию с 1976 г. Авторы каталога предлагают классификацию типов солнечного ветра [Yermolaev и др., 2009], которая включает межпланетные ударные волны (IS), область сжатия (SHEATH) и тело МКВМ (EJE и MC). Каталог содержит данные о типе солнечного ветра и продолжительности наблюдения для каждого события. Для определения типа солнечного ветра авторы используют разработанные ими признаки МКВМ. Автоматический алгоритм анализирует данные солнечного ветра в L1 в часовом разрешении (из БД OMNI) и делит весь временной ряд на типы. Авторы отмечают, что не исключается ручное внесение изменений в полученный алгоритмом результат после экспертной оценки сложных событий. Среди параметров, используемых для выделения МКВМ, авторы указывают следующие данные из БД OMNI:

- параметры магнитного поля Земли (GSE и GSM);
- плотность, скорость и температура плазмы;
- характеристики потоков заряженных частиц;
- количество солнечных пятен;
- индексы геомагнитной активности Kp, Dst и C9.

Эти сведения дополняются вычисленными параметрами солнечного ветра, исходя из которых определяется тип потока.

Для использования данных каталога ИКИ РАН в настоящей работе были выделены следующие типы солнечного ветра, описывающие МКВМ:

- IS+SHEATH+EJE/MC
- IS+EJE/MC
- EJE/MC.

3.2.Создание объединенного каталога

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. Далее в этой главе предлагается алгоритм объединения описанных каталогов, анализ результирующего объединенного каталога МКВМ (ОК МКВМ) НИИЯФ МГУ.

3.2.1. Актуальный алгоритм объединения

Алгоритм объединения основан на совпадении временных параметров событий из исходных каталогов. Если события удовлетворяют критериям объединения – то они считаются одним событием, если нет, то они попадают в объединенный каталог как отдельные МКВМ. Каталоги объединяются последовательно. При отличии временных параметров объединяемых МКВМ в пределах допуска в ОК МКВМ записывается значение из более приоритетного каталога. Порядок приоритетности при этом: 1 – каталог МКВМ Ричардсона и Кейн (далее RC); 2 – информация из ССМС СМЕ Scoreboard (далее Scoreboard); 3 – События МКВМ из каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра ИКИ РАН (далее ИКИ). Порядок объединения: первым этапом объединяются RC и Scoreboard, затем результат их объединения объединяется с ИКИ.

Каталог	T_{shock}	T_{start}	T_{source}	Тип тела
RC	+	+	$\pm$	+
Scoreboard	+	-	+	-
ИКИ	$\pm$	+	-	+

Таблица 6. Информации о наличии (+), отсутствии (-) или частичном наличии ($\pm$) параметров МКВМ в исходных каталогах.

Критерии объединения:

- Объединяются события из разных каталогов (каталог i и каталог j);
- Совпадают временные параметры по одному из следующих условий, проверяющихся последовательно:
 1. Объединяются события при: $|T_{shock}^i - T_{shock}^j| \leq 6 \text{ ч.}$;
 2. Объединяются события при: $|T_{start}^i - T_{start}^j| \leq 24 \text{ ч.}$;
 3. При проверке совпадений между каталогами Scoreboard и ИКИ допустимо объединение при выполнении следующего условия:
 $|T_{shock}^{Scoreboard} - T_{start}^{ИКИ}| \leq 24 \text{ ч.}$

В таблице 6 перечислены основные параметры используемые для объединения и сравнения исходных каталогов между собой. Из таблицы видно, что при сравнении событий, присутствующих только в каталогах Scoreboard и ИКИ, возможна ситуация, в которой у невозможно сравнить события по одному и тому же параметру. В таком случае допускается сравнение между T_{shock} , указанным в Scoreboard, и T_{start} , указанным в ИКИ. Информация об источнике вносилась в ОК при её наличии в исходных каталогах. При наличии конфликтующей информации об источнике в объединяемом событии (между каталогами RC и Scoreboard) в ОК фиксировался источник из приоритетного каталога, а альтернативный источник указывался в колонке T_{source}^* . Алгоритм объединения проиллюстрирован на блок-схеме (см. Рисунок 3.1).

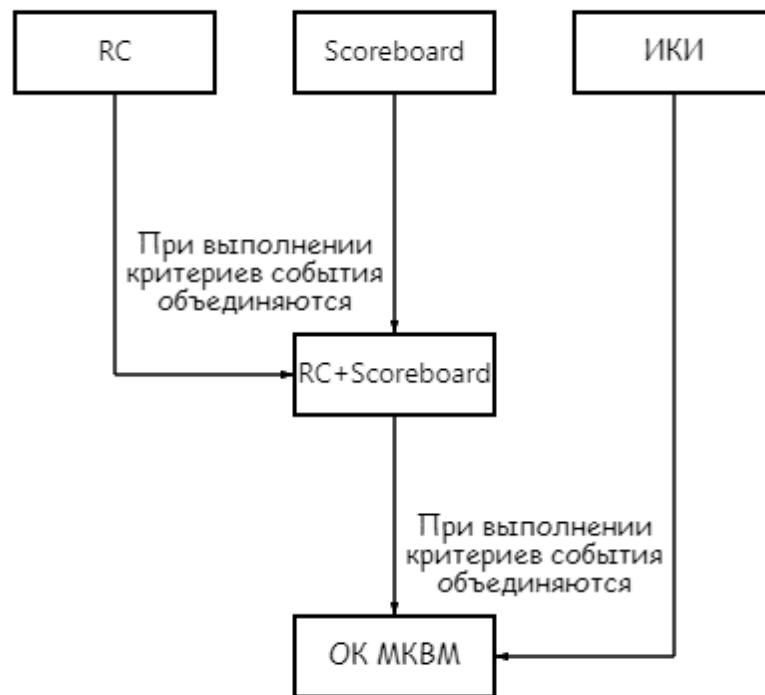


Рисунок 3.1. Блоксхема объединения исходных каталогов в ОК МКВМ.

Чтобы расширить информацию о МКВМ и оценить геоэффективность событий объединённого каталога, были рассчитаны минимальное значение индекса Dst, а также максимальное и среднее значение скорости солнечного ветра по данным OMNI за период времени, соответствующий прохождению МКВМ. Для событий, у которых определено время начала и окончания наблюдения тела МКВМ, значения параметров вычислялись за период с T_{start} до T_{end} . В случае событий, которые присутствуют только в каталоге ССМС CME Scoreboard, известно только T_{source} и T_{shock} . У таких событий в качестве начала периода использовалось T_{shock} , а в качестве времени окончания — $T_{shock} + \langle duration \rangle$, где $\langle duration \rangle$ — средняя продолжительность регистрации тела МКВМ, которая в объединённом каталоге составляет 20 часов.

Актуальная версия каталога опубликована на https://swx.sinp.msu.ru/tools/icme_list.php.

3.2.2. Различные версии каталога

В процессе разработки алгоритм претерпевал изменения, например, в версиях ОК МКВМ, использованных в работах ([Ширяев, Капорцева, 2023; Shugay и др., 2022]), использовалось в первую очередь время наблюдения источника МКВМ (при объединении RC и Scoreboard) и МКВМ имевшие различные источники считались отдельным событием даже при совпадении времени наблюдения на 1 а.е. События объединялись при совпадении времени источника с точностью до 1 часа, что приводило к наличию в каталоге событий у которых время наблюдения на 1 а.е. могло различаться более чем на 24 часа (см. Рисунок 3.2). После анализа результатов было принято решение отказаться от объединения событий по времени наблюдения источника и в работе [Kaporotseva и др., 2024].

Кроме этого, события из каталога Scoreboard имеющие одинаковое время регистрации ударной волны, но различные солнечные источники считались отдельными МКВМ, что приводило к наличию в каталоге «двойников».

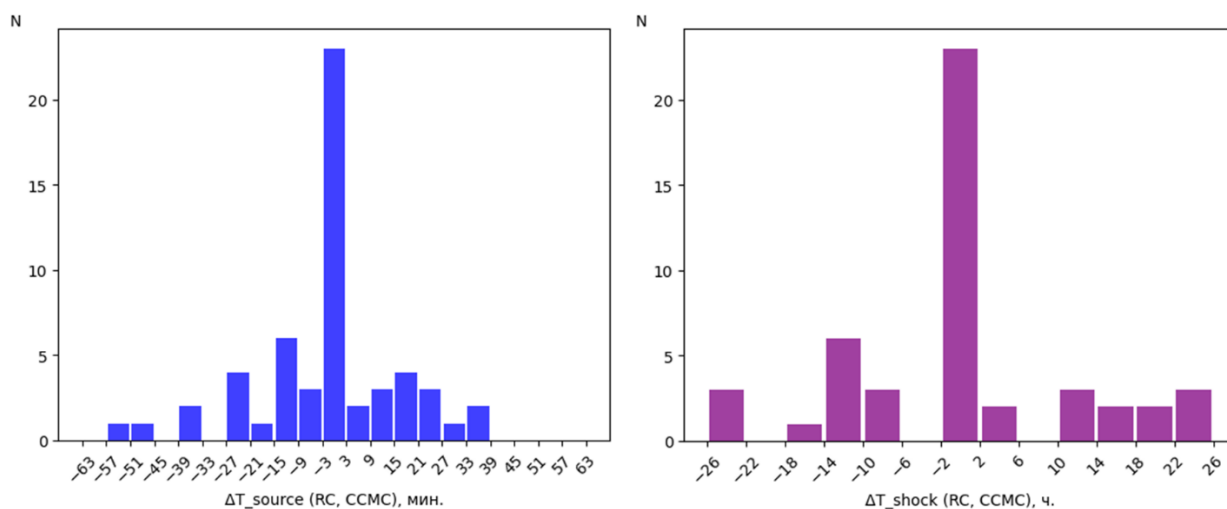


Рисунок 3.2. Гистограммы отличия временных параметров объединенных событий между каталогами RC и Scoreboard(CCMC) в одной из предыдущих версий объединения для событий за 2013-2021. По оси Y количество событий, по оси X разница во времени в часах.

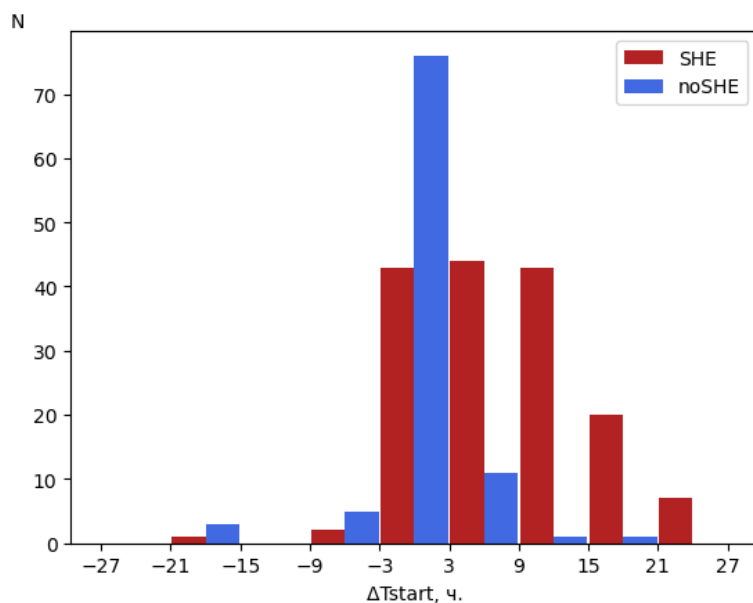


Рисунок 3.3. Гистограмма отличия во времени начала наблюдения тела МКВМ после объединения с каталогом ИКИ для двух вариантов объединения, в которых в качестве времени начала тела МКВМ по каталогу ИКИ считается начало области сжатия SHEATH (SHE – красные бины) либо начало наблюдения тела МКВМ MC/EJECTA (noSHE – синие бины). По оси Y количество событий, по оси X разница во времени в часах. Анализ приведен для событий за 2013-2021

Проверялись различные подходы к использованию данных каталога ИКИ. В одной из предыдущих версий в качестве времени начала тела МКВМ использовалось время наблюдения SHEATH. Отказ от рассмотрения области сжатия в качестве начала тела МКВМ привел к заметному улучшению совпадения между объединяемыми событиями (см. Рисунок 3.3).

3.3. Анализ объединенного каталога

Здесь приведен анализ объединенного каталога для периода 2010–2018 гг., так как именно этот период необходим для валидации модели прогноза в 24 цикле солнечной активности. В исходных каталогах RC, Scoreboard, ИКИ соответственно 175, 87 и 318 событий (см. Таблица 7.). В результате объединения получается список из 400 событий с пересечениями между разными исходными каталогами, описанными в таблице 8. Доля непересекающихся событий в ОК МКВМ равна 10%, 9% и 44% для каталогов

RC, Scoreboard, ИКИ соответственно. 147 событий (37%) из ОК МКВМ присутствовали как минимум в двух исходных каталогах, а 33 события были упомянуты во всех исходных каталогах.

		Количество событий	Источник
Исходные каталоги	RC	175	Каталог МКВМ Ричардсона и Кейн
	Scoreboard	87	CCMC CME Scoreboard
	ИКИ	318	Каталог крупномасштабных типов солнечного ветра ИКИ РАН
ОК МКВМ	Всего событий	400	

Таблица 7. Количество событий в исходных и объединенном каталоге.

Состав объединенного каталога		кол-во событий в каждой группе
Не объединенные события	RC	38
	Scoreboard	37
	ИКИ	178
События объединенные между каталогами	RC + Scoreboard	7
	RC + ИКИ	97
	Scoreboard + ИКИ	10
	RC + Scoreboard + ИКИ	33

Таблица 8. Состав объединенного каталога.

Мы сравнили такие параметры МКВМ, как продолжительность и минимальный Dst, для непересекающихся событий и событий, пересекающихся как минимум в двух исходных каталогах (см. Таблица 9). На

основании результатов анализа характеристик событий из разных композиций каталогов (Таблица 9) можно предположить, что события, не пересекающиеся между каталогами, являются более слабыми событиями, меньшей продолжительностью и приводят к незначительным геомагнитным возмущениям. Распределение событий по вызванным ими геомагнитным возмущениям показано на рисунке (Рисунок 3.4). Несмотря на тенденцию к большей геоэффективности пересекающихся событий, из гистограммы следует, что существует значительное меньшинство ($\approx 10\%$) непересекающихся событий, вызывающих геомагнитные бури с Dst -50 нТл и сильнее, что подчеркивает важность объединения данных из разных каталогов МКВМ.

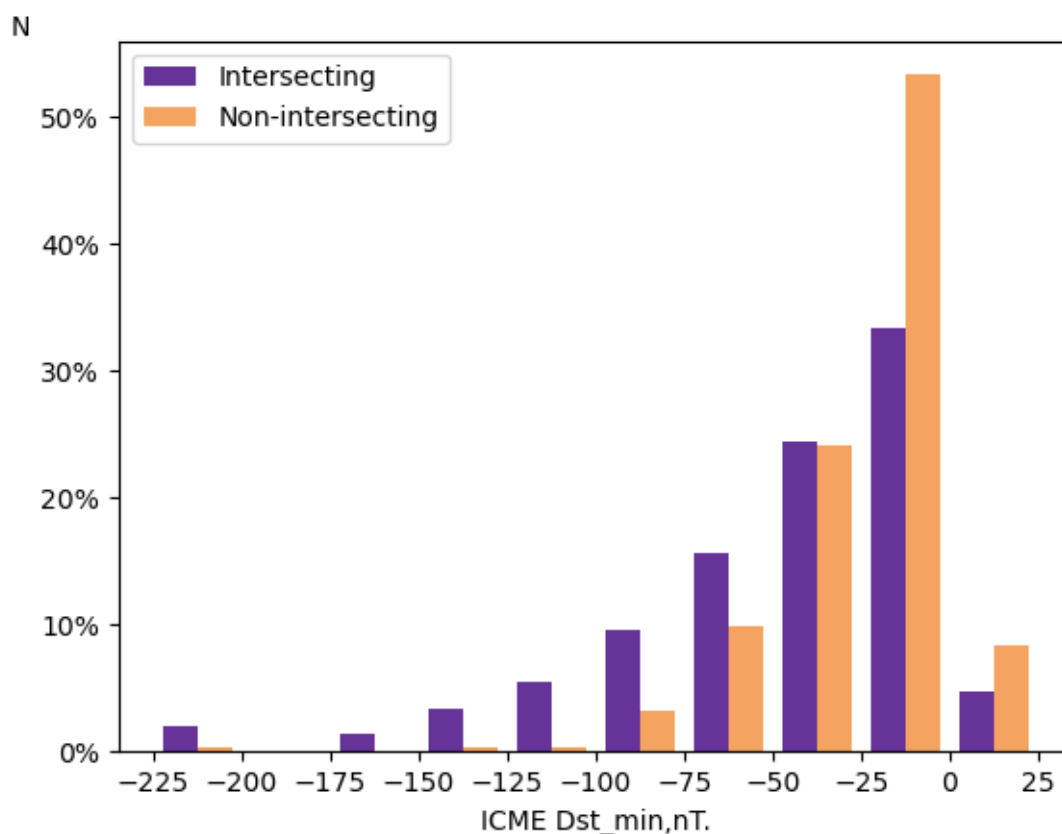


Рисунок 3.4. Распределение минимального значения Dst, зарегистрированного за время наблюдения МКВМ. Распределение представлено для двух множеств: события необъединенные между каталогами (оранжевые бины – non-intersecting), и событий объединенные хотя бы по 2м каталогам (фиолетовые

бины – intersecting). По оси Y количество событий в процентах от общего числа каждого множества, по оси X Dst в нТл.

	RC + Scoreboard	ОК МКВМ	подмножества объединенного каталога		
			A1	A2	A3
Кол-во событий	262	400	253	147	33
среднее $D_{st_{min}}$ (нТл)	-45	-35	-26	-50	-70
средняя длительность (ч.)	24	23	22	26	30

Таблица 9. Характеристики событий из ОК МКВМ и его подмножеств: A1 – события присутствуют только в одном исходном списке, A2 – события присутствуют как минимум в двух исходных списках, A3 – события упоминаются во всех исходных списках. В отдельной колонке RC + Scoreboard анализ событий для результата объединения только этих каталогов.

Мы также сравниваем тип тела МКВМ, указанный в RC и ИКИ. Каталог RC представляет три потенциальных случая: 1) МКВМ не является зарегистрированным магнитным облаком и лишен большинства типичных особенностей магнитного облака; 2) МКВМ демонстрирует признаки вращения в направлении магнитного поля, но отсутствуют некоторые другие характеристики магнитного облака. 3) Сообщалось о магнитном облаке, связанном с МКВМ. Будем рассматривать случаи 1 и 2 как «ejecta», а случай 3 как «mc». В каталоге ИКИ МКВМ разделены на две категории: «ejecta» и «mc». Количество событий каждого типа по каждому каталогу представлено в таблице 10.

Анализ 130 объединенных событий (см. Таблица 11), перечисленных как в RC, так и в ИКИ, показывает, что идентификация магнитного типа тела МКВМ (МС или ejecta) совпадает для 71% из них. Мы также рассчитали среднее значение минимального индекса Dst, наблюдаемого во время регистрации тела МКВМ. Из таблицы 11, следует, что события, обозначенные как «МС» в обоих

каталогах, оказались более геоэффективными, чем те, которые были обозначены как «ејеста».

	Тип тела МКВМ	Объединенные события между РС и ИКИ	Все события
РС	МС	60	76
	ЕЈЕ	70	99
	всего	130	175
ИКИ	МС	44	56
	ЕЈЕ	86	262
	всего	130	318

Таблица 10. Количество событий, идентифицированных как ејеста/magnetic cloud в каталогах источников.

		ИКИ	
		МС	ЕЈЕ
РС	МС	33 ($\langle Dst \rangle = -74$ nT)	27 ($\langle Dst \rangle = -51$ nT)
	ЕЈЕ	11 ($\langle Dst \rangle = -65$ nT)	59 ($\langle Dst \rangle = -31$ nT)

Таблица 11. Анализ совпадений в идентификации типа тела МКВМ согласно каталогам РС и ИКИ в 130 событиях, объединенных между этими каталогами.

Глава 4. Прогнозирование КВМ в 23 цикле солнечной активности¹

В первой главе обсуждались результаты использования комбинации DBM и КСВ моделей для прогнозирования прихода КВМ и солнечного ветра в целом. Однако важной задачей является не только прогнозирование распространения КВМ, но и процесс отбора геоэффективных КВМ на этапе их появления в солнечной короне. Данная глава посвящена разработке и тестированию алгоритма отбора событий, анализу работы системы прогноза прихода КВМ в целом на различных фазах цикла солнечной активности

4.1. Система прогнозирования прихода КВМ в НИИЯФ МГУ

4.1.1. Входные данные

база данных	CACTus	Solar Demon
ссылка	https://www.sidc.be/cactus/	https://solarDemon.oma.be/
описание	[Robbrecht, Berghmans, 2004]	[Kraaikamp, Verbeeck, 2015]
источник данных	LASCO-C2 на КА SOHO (в точке L1)	AIA(21.1 нм) на КА SDO, геосинхронная орбита
частота обновлений	6 часов	1 минуты (задержка 15 минут)
временное разрешение	8 минут	2 секунды

Таблица 12. Описание используемых баз данных.

¹ При написании данной главы использовались материалы публикаций по теме диссертации 3 и 4, выполненных автором в соавторстве.

В таблице 13 перечислены все данные измерений космических аппаратов используемые в системе прогнозирования. Некоторые данные используются на прямую, как изображения AIA/SDO для расчета площади КД. Данные по KBM и диммингам используются через базы данных CACTus и Solar Demon (Таблица 12), где происходит автоматическая обработка изображений LASCO C2 и AIA/SDO. Данные обработки KBM и диммингов (временные, геометрические и другие параметры) доступны в указанных базах данных в режиме близком к реальному времени, что позволяет использовать их в онлайн прогнозировании.

параметр	источник данных	использование	
		Отбор событий	Моделирование
Скорость KBM на $5R_s$ v	база данных CACTus	-	Пересчет на $20 R_s$ в приближении равномерного распространения;
Время наблюдения KBM T_{start}		Объединение событий, отбор событий, сопоставление KBM-димминг для отбора событий	Использование в DBM модели
Угол раствора конуса α			-
Позиционный угол ρ			-
Время наблюдения димминга	База данных Solar Demon	Сопоставление KBM-димминг для отбора событий	-
Координаты димминга			
Площадь КД в геоэффективной области	изображения AIA/SDO	-	Пересчет в скорость фонового ветра по модели KCB и дальнейшее

			использование скорости в DBM
--	--	--	------------------------------

Таблица 13. Описание данных, необходимых для работы системы, их источника, и их использования.

4.1.2. Алгоритм отбора событий

Алгоритм состоит из нескольких этапов, включает в себя объединение и фильтр узких KBM, сопоставление с диммингами и фильтрацию по параметрам димминга

Этап 0. Подготовка данных CACTus.

Данные из БД CACTus используются для отбора геоэффективных событий. В базе ведутся автоматические регистрации всех потоков, наблюдаемых в коронографе в режиме близком к реальному времени (обновление раз в 6 часов). Все регистрации делятся на 2 списка – «сте» и «flow». В список «flow» попадают «слабые» и «не надежные» регистрации – это могут быть короткие, очень узкие или не яркие потоки. Мы объединяем оба списка, а затем выполняем объединение событий по угловым и временным параметрам, чтобы избежать ситуации, когда KBM типа гало разделяется автоматической системой на несколько потоков. Безусловно сложно 100% определять угловой растров KBM только с помощью алгоритмов, именно поэтому многие системы пользуются экспертной оценкой для определения параметров KBM по изображениям коронографа. Однако необходимость иметь автоматические, оперативные прогнозы допускает некоторые неточности в определении параметров события. Для примера на рисунке (Рисунок 4.1) приведены события, произошедшие в 2011 году. Первое событие (верхние скриншоты)

относятся к событию 16.04 2011 года. Скриншоты взяты с сайта БД CACTus, белыми линиями на них отмечены автоматически определяемые границы события. Видно, что из-за особенностей внутренней структуры выброса автоматическая система разделила единый выброс на три отдельные регистрации. Каждый из отдельных выбросов имеет угол раствора менее 30 градусов, и такие события были отфильтрованы на следующем этапе. После объединения угол раствора конуса стал 56 градусов (см. Таблица 14), что лучше описывает наблюдаемое явление.

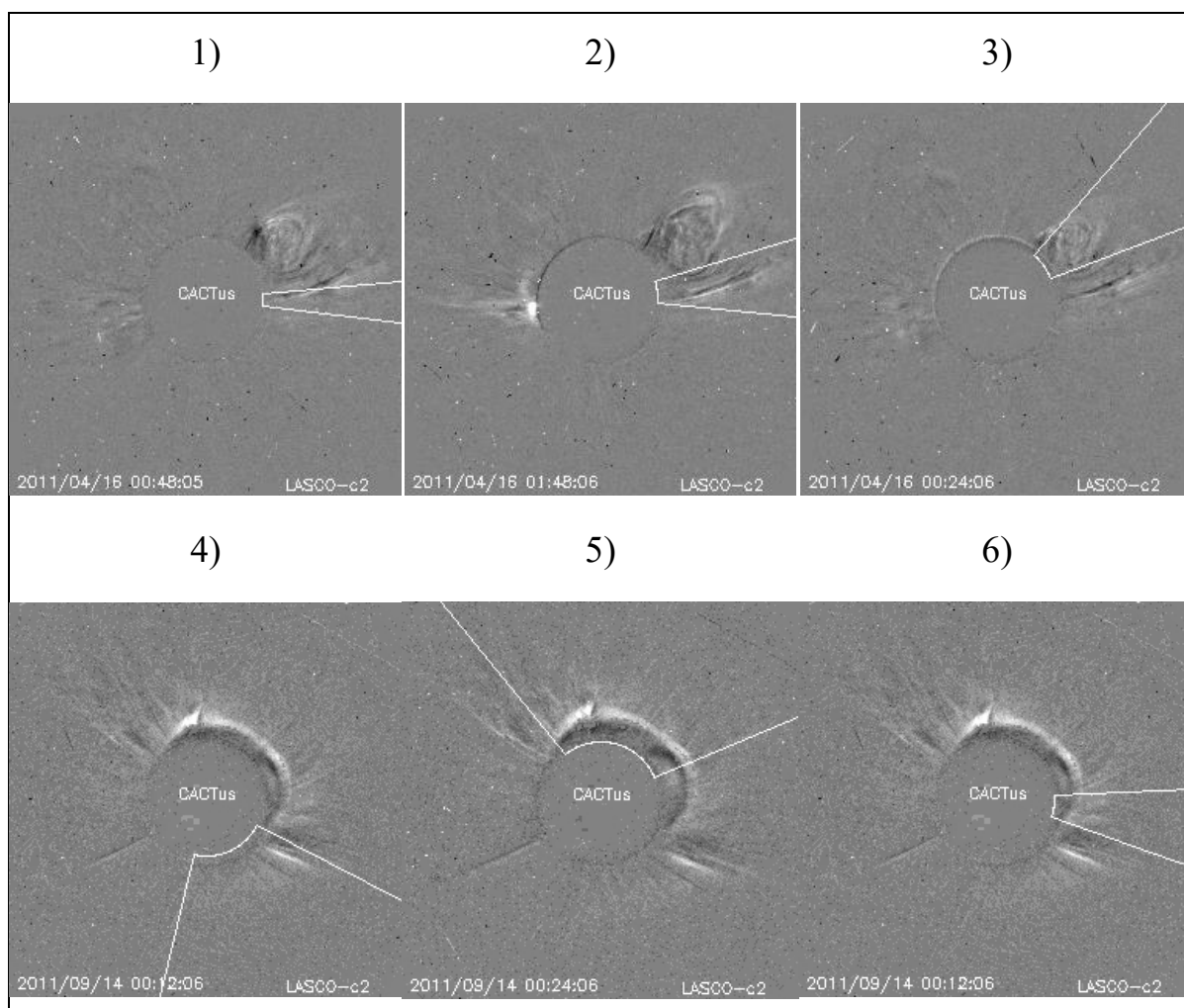


Рисунок 4.1.Примеры одиночных КВМ детектированных системой CACTus, как несколько выбросов. Скриншоты 1-3 относятся к событию в апреле 2011. Скриншоты 4-6 относятся к событию в сентябре 2011. Белыми линиями на скриншотах указаны автоматически определяемые системой CACTus границы КВМ.

На нижних скриншотах приведено событие типа частичное гало, наблюдавшееся 14.09.2011. Этот выброс был также распознан автоматической системой, как несколько отдельных событий. Угловые параметры выброса удалось уточнить благодаря алгоритму объединения (см. Таблица 14).

Известные угловые параметры KBM – это угол раствора конуса KBM в картинной плоскости, определяемый по изображению коронографа в градусах - da , и позиционный угол – угол, определяемый в картинной плоскости по изображению коронографа, между направлением на север («наверх») и вектором, соответствующим центру конуса KBM (угол откладывается против часовой стрелки). Пример определения pa и da показан на рисунке (Рисунок 4.2).

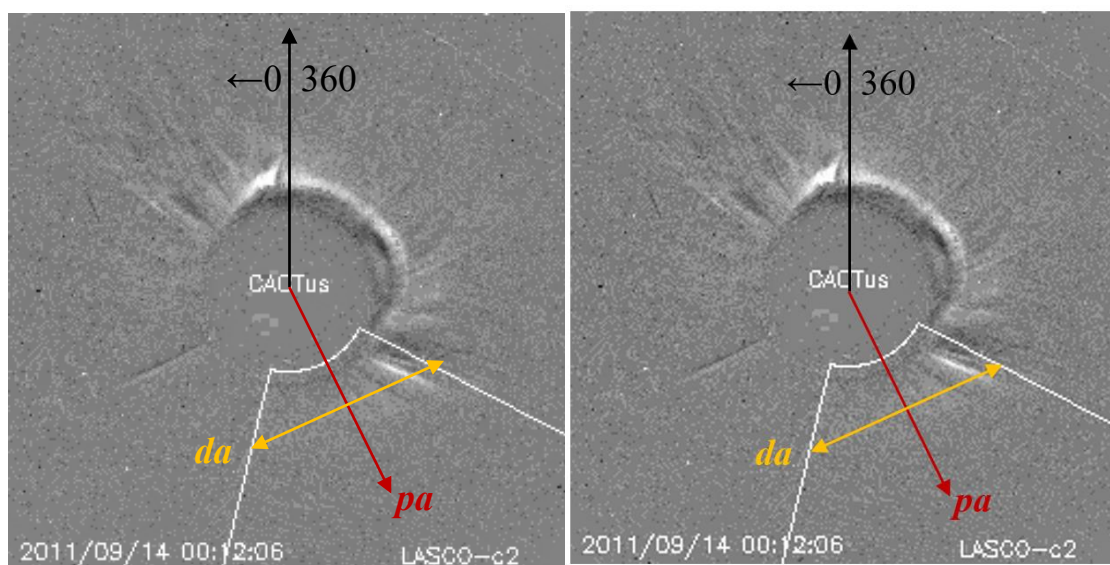


Рисунок 4.2. Пример определения угловых параметров выброса.

Описание алгоритма объединения

События KBM из списков «сте» и «flow» заносятся в один список в порядке времени их регистрации. Два последовательных события объединяются, если выполняются следующие условия:

- Временная разница между началами событий составляет менее 50 минут

- Зазор между углами раствора конусов КВМ составляет менее 20 градусов

При объединении временные параметры итогового выброса рассчитываются следующим образом:

$$14 \quad \begin{cases} Tstart_{fin} = \min(Tstart_1, Tstart_2) \\ Tend_{fin} = \max(Tend_1, Tend_2) \\ dt_{fin} = Tend_{fin} - Tstart_{fin} \end{cases} ,$$

где, $Tstart$ и $Tend$ – время начала и окончания наблюдения КВМ в коронографе, индекс «fin» - относится к параметрам результирующего выброса, а индексы 1 и 2 – к параметрам исходных. dt обозначает длительность наблюдения КВМ.

	№	Время начала	dt (ч.)	pa (°)	da (°)	v (км/с)
Событие в апреле 2011						
до объединения	1	15.04.2022 23:05	1	269	12	141
	2	15.04.2023 23:30	5	276	22	318
	3	15.04.2022 23:48	1	305	28	320
после объединения	-	15.04.2022 23:05	5,5	291	56	275
Событие в сентябре 2011						
до объединения	4	13.09.2011 23:36	1	346	106	289
	5	13.09.2011 23:36	1	205	76	347
	6	13.09.2011 23:48	1	8	6	157
после объединения	-	13.09.2011 23:36	1	283	232	318

Таблица 14. Пример параметров объединяемых событий, проиллюстрированных на Рисунок 4.1. Номера событий соответствуют номерам на Рисунок 4.1.

Параметры скорости объединенного КВМ рассчитываются по-разному, в зависимости от длительности и угловых растворов изначальных КВМ, согласно формуле:

$$15 \quad \text{если } \begin{cases} da_i \geq 180 \\ da_j < 180 \end{cases}, \text{ или } \frac{da_i}{da_j} \geq 2, \text{ то: } v_{fin} = v_i, \text{ иначе: } v_{fin} = \frac{(v_i + v_j)}{2},$$

где индексы i и j – указывают на параметры начальных КВМ, а индекс fin – на параметры объединенного.

Примеры объединения указаны в таблице 14, и изначальные события показаны на рисунке (Рисунок 4.1). Здесь в первом событии сначала объединяются №1 и №2, а затем с результатом их объединения объединяется событие №3. При этом итоговая скорость считается как средняя между тремя, так как угол раствора ни одного из выбросов не превышает 180, и не превышает другие более чем в 2 раза. Во втором событии сначала объединяются №4 и №5, при этом результирующая скорость считается как средняя между ними. Результат их объединения объединяется с №6, но так как у события №6 слишком маленький угол раствора, его скорость не учитывается в расчете результирующей.

Система фильтров.

После объединения КВМ формируется начальная база событий. Далее система фильтров будет присваивать каждому событию код по каждому фильтру (условно 0-1). В итоге события, которые прошли все фильтры, будут иметь код, состоящий из 1, что будет говорить о том, что это событие считается геоэффективным. Для всех событий из начальной базы прогнозируется скорость и время прихода к Земле, однако события, не считающиеся геоэффективными можно игнорировать при публикации прогноза. События, не считающиеся геоэффективными, не удаляются из базы, а также прогнозируются, чтобы оставить возможность анализировать эффективность

работы системы отбора событий, и менять её в зависимости от фазы цикла солнечной активности.

Можно выделить 3 основных этапа фильтрации, соответственно каждое событие будет иметь 3х-значный код, определяющий его итоговую геоэффективность.

Этапы фильтрации при таком подходе можно рассматривать параллельно, то есть событие проверяется на каждом этапе вне зависимости от того, с каким результатом оно прошло предыдущий этап.

При работе с финальным результатом при этом подходе можно выделить только те события, которые прошли все три этапа, что соответствует последовательной фильтрации.

Этап 1. Фильтр узких

На первом этапе события разделяются по углу раствора конуса. В случае «полярных» КВМ, у которых $pa \in [0; 60] \cup [120; 240] \cup [300; 360]$, геоэффективными считаются выбросы с $da \geq 60$, а в случае «экваториальных» КВМ, у которых $pa \in (60; 120) \cup (240; 300)$, геоэффективными считаются выбросы с $da \geq 30$.

Этап 2. Сопоставление КВМ-димминг (условия A, B, C)

Сопоставление КВМ, наблюдаемых в коронографе и диммингов, необходимо для определения координат источника выброса на солнечном диске, и отсеивании КВМ, произошедших на обратной стороне Солнца. Некоторые исследователи для этой же цели используют связь вспышек и КВМ, так как зачастую вспышки сопровождаются выбросами и наоборот. Однако, вспышки и КВМ всё же представляют собой различные явления, и их установление связей между ними – может быть сложной задачей. В то время как димминги являются «следами» КВМ в нижней короне Солнца, таким образом каждый КВМ, имеющий источник на видимой стороне Солнца, должен однозначно

связываться с диммингом, наблюдаемым на Солнечном диске, в случае если приборы и системы регистрации этих событий работают в штатном режиме.

Корональные димминги – кратковременные локальные понижения яркости диска Солнца в жёстком ультрафиолетовом и мягком рентгеновском излучении, вызванных понижениями плотности вещества в короне Солнца из-за выброса солнечной плазмы. В работах различных авторов обсуждается связь диммингов и КВМ [Harra, Sterling, 2001]. Существуют работы, в которых подробно описан статистический анализ между параметрами диммингов и параметрами КВМ: скоростью, массой, по наблюдениям на диске [Dissauer и др., 2019; López и др., 2019] и над лимбом [Chikunova и др., 2020]. Димминги могут содержать в себе информацию о ранней фазе развития КВМ, включая данные о нерадиальной составляющей направления распространения КВМ [Chikunova и др., 2023].

Для установления соответствия КВМ-димминг необходимо выполнение следующих условий:

А) Начало наблюдения димминга должно быть не ранее чем за 2 часа до начала наблюдения КВМ, и не позднее.

В) Димминг должен удовлетворять условиям:

- длительность наблюдения не менее 10 минут;
- Наблюдаются значения Total Intensity менее 0,5 единиц и не нулевые значения производной интенсивности;
- разброс координат геометрического центра димминга не должен превышать выбранное значение, иначе димминг считается множественным, и, следовательно, алгоритмически невозможно рассчитать параметры каждого димминга отдельно:

$$\begin{cases} | \langle x \rangle - x_i | \leq 0,1 \\ | \langle y \rangle - y_i | \leq 0,1 \end{cases}$$

где $\langle x \rangle$ и $\langle y \rangle$ - координаты геометрического центра димминга усредненные по времени наблюдения, а x_i и y_i - координаты геометрического центра димминга в каждый момент наблюдения;

С) если КВМ не является типа гало или полу гало ($da < 180$), а димминг не является центральным ($Rdist > 0,25$), то выполняется **проверка по углу**. Позиционный угол КВМ (pa), должен отличаться от аналогичного угла для димминга (pa_{dim}) не более, чем на 90 градусов. pa_{dim} рассчитывается между направлением на север и направлением на положение геометрического центра димминга (усредненное за время наблюдения), против часовой стрелки, в градусах.

Этап 3. Фильтр по параметрам димминга

Геометрический центр димминга (усредненный за время наблюдения), не должен выходить за границы солнечного диска, то есть: $Rdist < 1$. 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.

4.1.3. Система прогнозирования

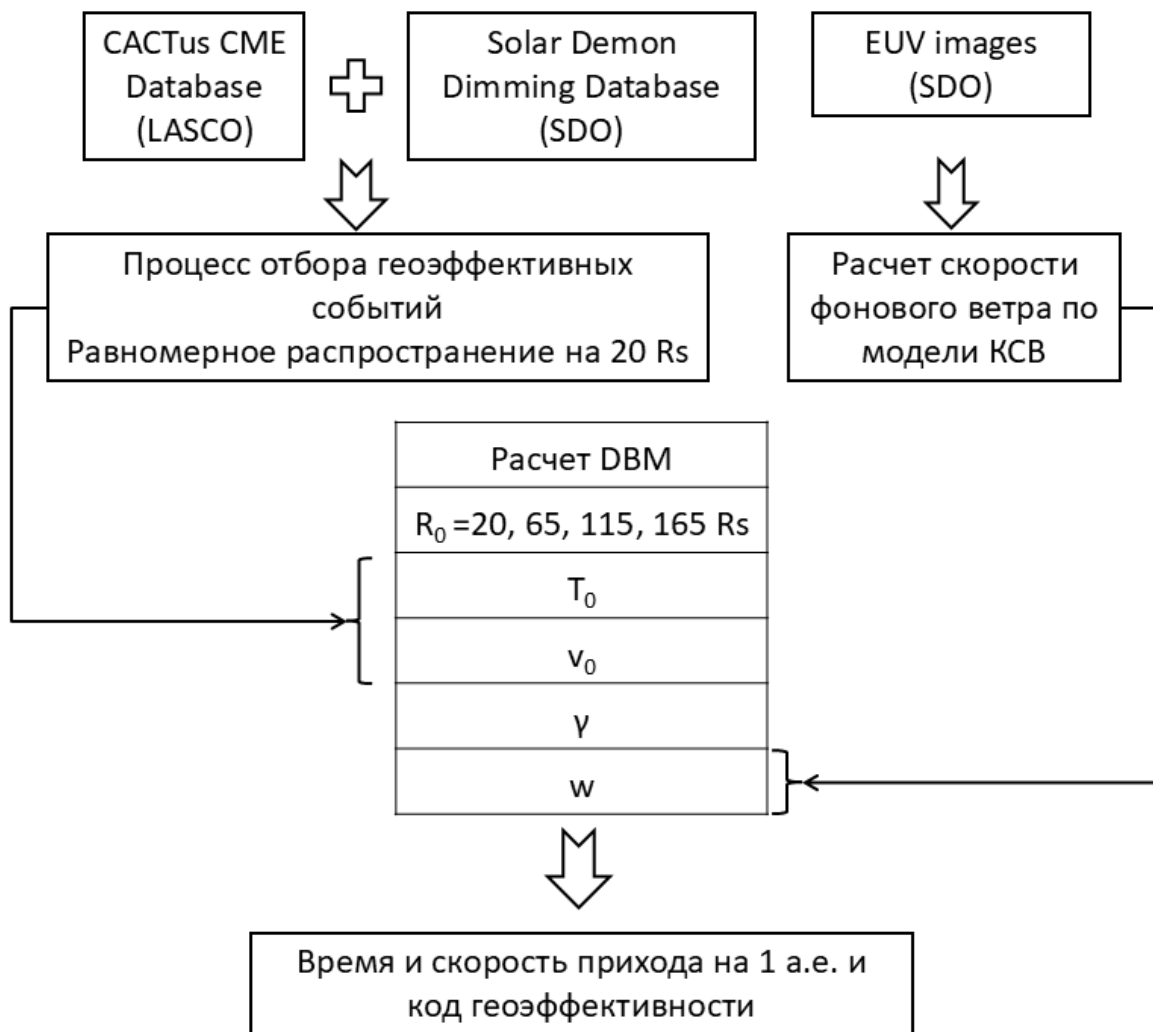


Рисунок 4.3. Блок-схема работы системы прогнозирования. Описания переменных DBM согласно таблице 1.

На рисунке (Рисунок 4.3) показана итоговая схема работы разработанной системы прогнозирования. Описание моделей DBM и KCB приведены в Главе 1 (п 1.1. и п. 1.2.). В итоге для каждого события из начальной базы KBM рассчитывается время и скорость прихода на 1 а.е. и трехзначный код геоэффективности, показывающий результат работы системы отбора.

4.1.4. Валидация результатов

В этом параграфе описываются применяемые методы оценки точности прогноза. Условно методы можно разделить на 2 подхода: оценка отбора

событий и оценка точности прогноза. Первый подход отвечает на вопрос, для скольких событий факт прихода (или не прихода) был предсказан верно, а второй – с какой точностью были спрогнозированы события с успешным предсказанием факта прихода.

В случае, когда существует тестовый набор событий, для которых мы заранее знаем факт прихода или не прихода, эти два оценка прогноза по этим двум методам является полностью независимой. Отдельно можно проверить, как работает алгоритм отбора событий и установить максимальное значение ошибки прогноза, при котором событие будет считаться спрогнозированным успешно. Далее можно проверить точность прогнозирования параметров прихода событий, считая, что факт прихода для них является истиной по умолчанию (как было сделано нами в Главе 1, п. 1.4).

Однако, в случае потокового онлайн прогнозирования, у нас нет возможности определить тестовый набор событий, поэтому два описанных метода будут всегда зависеть друг от друга. Плохая точность прогнозирования событий будет приводить к тому, что количество удачных прогнозов будет меньше, а промахов и ложных прогнозов – больше.

Валидация отбора событий

Для валидации результатов используется объединенный каталог МКВМ, описанный в Главе 2. Для каждого спрогнозированного события производится поиск соответствующего МКВМ из каталога, так чтобы время начала регистрации тела МКВМ отличалось от спрогнозированного времени прибытия не более чем на выбранную дельту. Таким образом вычисляются значения hit и false alarm соответственно для событий, сопоставленных и не сопоставленных с МКВМ. В ходе работы системы фильтров, мы можем отбросить часть событий, которые система не сочла геоэффективными, в таком случае также вычисляются параметры miss и correct rejections. Описание этих параметров приведено в таблице 15.

Для множества МКВМ из каталога вычисляется количество предсказанных (P) и не предсказанных (U) событий. В случае, когда каждый КВМ приводит к одному МКВМ, значение hit равняется P. Однако, мы считаем, что возможны случаи, когда несколько КВМ взаимодействуют и объединяются в одно МКВМ во время распространения от Солнца к Земле. Противоположная ситуация – невозможна. Один выброс на Солнце не должен приводить к нескольким регистрациям МКВМ у Земли. Поэтому значение hit всегда больше или равно значению P, однако достоверно проверить действительно ли все прогнозируемые КВМ слились в один в регистрируемый у Земли МКВМ – невозможно.

Множество событий	Параметр	Описание
Прогнозируемые события	hit	кол-во событий, которые сбылись и наблюдались
	false alarm	кол-во событий, которые были спрогнозированы и не наблюдались
	correct rejection	кол-во событий, для которых был прогноз «не прихода», и они не наблюдались
	miss	кол-во событий, для которых был прогноз «не прихода» или не было прогноза, а они наблюдались
Наблюдаемые события	predicted-P	кол-во предсказанных МКВМ
	unpredicted-U	кол-во не предсказанных МКВМ

Таблица 15. Описание параметров валидации по количеству удачных прогнозов.

Аналогичная ситуация с параметрами miss и U. Если система отбирает все КВМ, которые приводят МКВМ, а далее предсказывает придут они к Земле или пройдут мимо, то значение miss должно равняться значению U. С учетом множественных КВМ – miss будет превышать U. Однако есть возможность того, что некоторые события КВМ не были детектированы в коронографе (т.н.

stealth сме), но дошли до Земли и попали в каталог МКВМ. В этом случае, количество таких событий не будет учитываться параметром miss, но будет учитываться параметром U. Неоднозначность соответствия в этом случае обоюдная.

Оценка точности прогноза

Точность прогноза оценивается для событий, которые были предсказаны успешно (hit). Для таких событий можно оценить точность прогноза времени прихода и скорости прихода путем сравнения их с соответствующими значениями из каталогов МКВМ. Ошибки прогнозирования оцениваются по формулам 9 и 10 для времени и скорости прихода соответственно. Для набора событий можно оценить среднюю ошибку, стандартное отклонение и среднюю абсолютную ошибку по формулам 11, 12 и 13 соответственно. Причем эти формулы можно использовать как для времени, так и для скорости событий.

4.2. Результаты за 23 цикл солнечной активности

4.2.1. Результаты работы системы отбора

Таблица 16 иллюстрирует количество наблюдаемых KBM в LASCO C2 по данным SASTus. После объединения событий (Этап 0) мы получаем 12186 событий, и после использования всех фильтров геоэффективными определяется только 4% этих событий. Наиболее существенное сокращение количества событий происходит за счет фильтра узких событий (Этап 1), а также более половины оставшегося количества мы отбрасываем из-за отсутствия соответствующего димминга (Этап 2). На последнем этапе количество событий снижается почти вдвое.

Этап отбора	Краткое описание	Кол-во геоэфф.	Процент геоэфф.
-------------	------------------	----------------	-----------------

Этап 0	Количество событий КВМ из базы CACTus после объединения	12186	
Этап 1	Фильтр узких	2964	24%
Этап 2	А) Сопоставление КВМ-димминг по времени	1174	10%
	В) Отбор слабых и множественных диммингов	1074	9%
	С) Сопоставление по углу	872	7%
Этап 3	Фильтр залимбовых событий	499	4%

Таблица 16. Количество событий, определяемых системой, как потенциально геоэффективных, на каждом этапе отбора.

Годовое распределение количества КВМ, произошедших с 2010 по 2018 гг., представлено на рисунке (*Рисунок 4.4*) (черная линия). Число КВМ нормировано на максимальное число событий, что соответствует 2420 КВМ, наблюдавшимся в 2013 г. Динамика количества КВМ соответствует динамике солнечного цикла: оно увеличивается в 2010-2011 гг., достигает максимума в 2012-2013 гг. и снижается. после 2015 г. Мы сравнили это количество с количеством КВМ, отобранных системой как геоэффективных, за каждый год (*Рисунок 4.4*, красная линия), также нормированным на максимальное количество выбранных событий, наблюдавшихся в 2013 г. (107 КВМ). Для отобранных событий наблюдается аналогичная динамика: рост в 2010–2011 гг., максимум в 2012–2014 гг., снижение в 2015–2016 гг., минимум в 2017–2018 гг. Единственное заметное отличие состоит в том, что снижение числа КВМ в 2015–2016 гг. происходит более резко для набора отобранных событий.

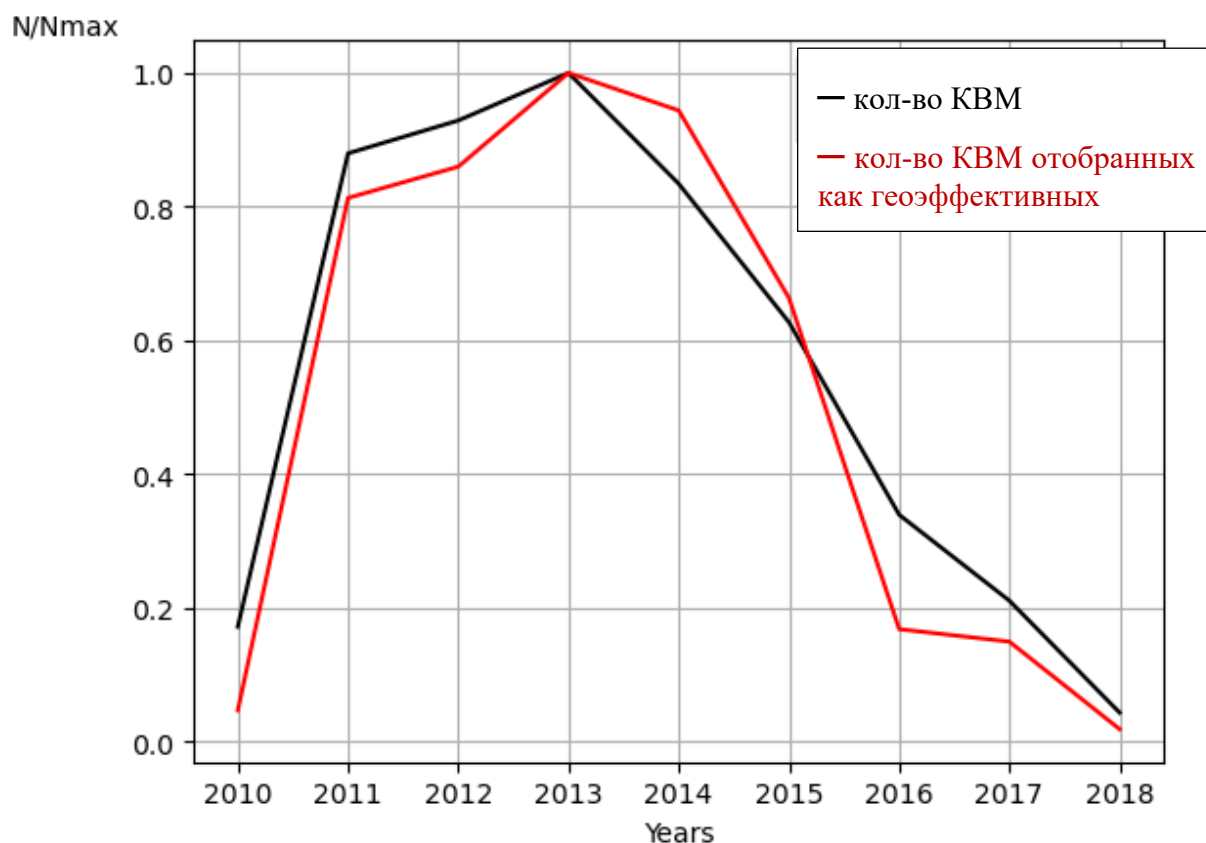


Рисунок 4.4. Годовое распределение количества событий из базы SAcus (черная линия) и событий, отобранных системой как потенциально геоэффективных (красная линия). Количество событий нормировано на максимальное годовое значение для каждого множества.

4.2.2. Результаты прогноза прихода событий

Сопоставление прогнозируемых событий с событиями из каталога МКВМ производилось для различных допусков ошибки прогнозирования. Максимальная ошибка прогнозирования была принята за 48ч., то есть предсказанные КВМ, совпадающие по времени прихода с временем наблюдения МКВМ с точностью 48ч. и выше, считались предсказанными удачно (hit).

Для целей проверки прогноза необходимо установить соответствие между наблюдаемыми событиями и прогнозируемыми событиями, которые остаются после применения всех фильтров. Количество удачно спрогнозированных

событий зависит от ряда факторов: 1. установленной максимально допустимой ошибки прогноза; 2. Используемый список МКВМ. Мы установили *максимальную ошибку прогноза времени прихода КВМ* как $\tau = 48$ часов, а затем проанализировали изменение количества прогнозируемых событий при уменьшении τ до 24 часов. Мы сравнили прогнозируемые нашей системой КВМ с двумя вариантами списка МКВМ: объединенного каталога МКВМ, описанного в Главе 2 (далее «МКВМ_1») и с ним же, но без учета событий из каталога ИКИ РАН (далее «МКВМ_2»). Ошибка прогноза времени прихода КВМ dt рассчитывается по формуле 9.

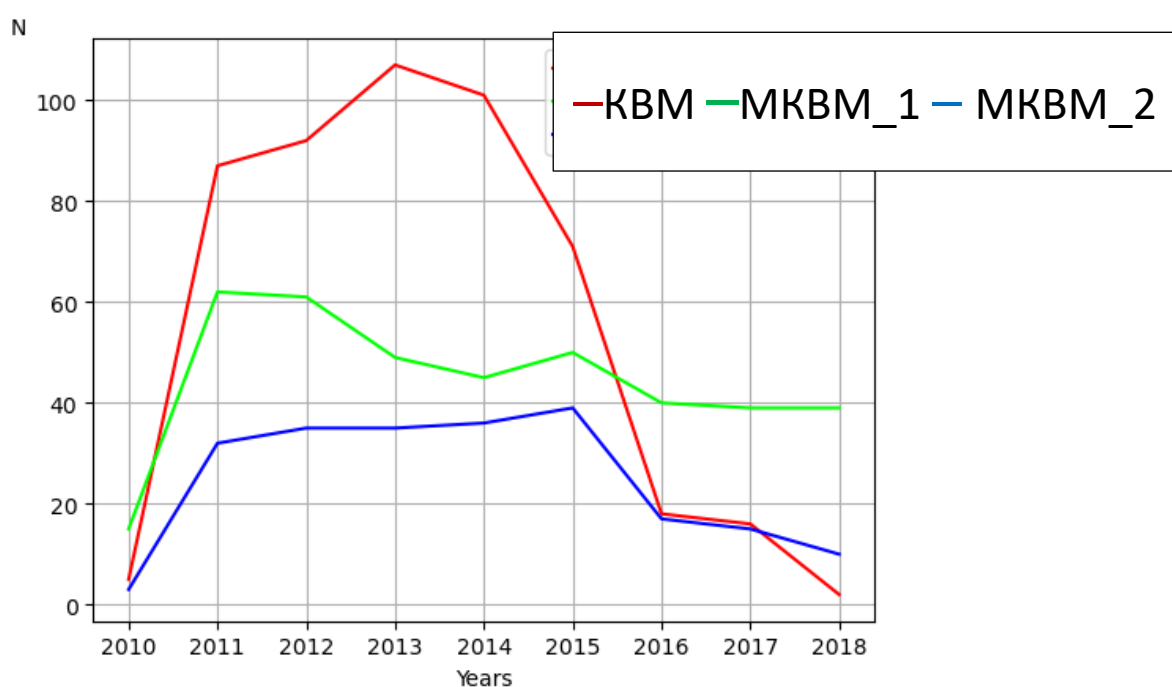


Рисунок 4.5. Распределение количества событий по годам. Красная линия соответствует количеству спрогнозированных, потенциально геоэффективных, КВМ (КВМ). Зеленая линия соответствует количеству МКВМ в объединенном каталоге (МКВМ_1), синяя линия - объединенный каталог МКВМ без учета каталога ИКИ РАН (МКВМ_2)

В таком случае параметр hit будет определяться количеством спрогнозированных КВМ, которым в соответствие можно поставить хотя бы один МКВМ с $|dt| < \tau$ – «попадания». Количество спрогнозированных событий, для которых это условие не выполняется, будет соответствовать количеству ложных тревог и определять параметр false alarm (fa).

Параметры hit и fa могут быть выражены в виде числовых значений, а также в виде отношения к общему количеству предсказанных КВМ. В случаях, когда КВМ соответствует нескольким МКВМ, мы выбираем пару КВМ-МКВМ с наименьшим $|dt|$, поскольку один КВМ не мог быть обеспечивать регистрацию несколько МКВМ на орбите Земли. Однако возможно обратное: несколько КВМ могли взаимодействовать друг с другом и быть обнаружены на орбите Земли как один МКВМ. Итак, в случаях, когда одному МКВМ соответствует несколько КВМ, мы считаем все эти КВМ попаданиями. Следовательно, количество удачно прогнозируемых КВМ превышает количество предсказанных МКВМ. Количество МКВМ, которые невозможно предсказать с помощью нашей системы с ошибкой меньше установленной τ , соответствует значению параметра Unpredicted (U). Параметр U также может быть выражен как в числовом значении, так и в процентах от полного количества МКВМ относительного полного числа событий в выбранном наборе МКВМ.

На протяжении большей части рассматриваемого периода времени количество прогнозируемы КВМ значительно превышает количество наблюдаемых МКВМ (см. Рисунок 4.5); однако в 2016–2018 гг. ситуация противоположная из-за резкого сокращения количества КВМ.

В таблице 17 представлено значения параметров валидации для различных значений τ : 48 ч. и 24 часа. Из всех 499 предсказанных СМЕ 196 соответствуют МКВМ с $|dt|$ менее 48 часов. Это соответствует 142 прогнозируемым МКВМ из всех 220, перечисленных в объединенном списке МКВМ. Доля не предсказанных событий составляет 36%. По мере уменьшения τ hit уменьшается, а количество не предсказанных МКВМ увеличивается.

	Сопоставление со списком МКВМ_2			Сопоставление со списком МКВМ_1	
события	КВМ	МКВМ		КВМ	МКВМ

все	499		222		499		400
τ	<i>Hit</i>	<i>FA</i>	<i>U</i>		<i>Hit</i>	<i>FA</i>	<i>U</i>
48 ч	40%	60%	36%		56%	44%	49%
24 ч	26%	74%	55%		36%	64%	65%

Таблица 17. Количество КВМ и МКВМ для двух списков МКВМ, и соответствующие им параметры валидации прогноза из таблицы 15. Значения рассчитываются для значений τ 48 и 24 часов и представлены в процентах от полного количества событий КВМ для hit и fa, или от общего чиста МКВМ в случае U.

Мы проанализировали, как выбранный для валидации набор МКВМ влияет на результаты прогнозирования. Данные ИКИ включают 318 МКВМ, 178 из которых не указаны в других каталогах (см. *Таблица 7*; *Таблица 8*). В таблице 17 представлены показатели hit, fa, U с учетом и без учета данных ИКИ РАН (МКВМ_1 и МКВМ_2 соответственно). При использовании МКВМ_2 значение hit увеличивается для всех значений τ (например, увеличивается с 26% до 36% для $\tau = 24$ ч). В этом случае использование данных ИКИ позволяет нам уменьшить процент ложных тревог. Однако при этом увеличивается и количество не предсказанных МКВМ.

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 данными из таблицы 9, где представлены средние значения минимума индекса Dst $\langle Dst_{min} \rangle$, зарегистрированные за период регистрации телами МКВМ для списка МКВМ_1 (см. столбец ОК МКВМ) и для списка МКВМ_2 (см. столбец (RC+Scoreboard)). Это значение больше для МКВМ_2, чем комбинации МКВМ_1, что свидетельствует о том, что в этом списке представлены более геоэффективные события.

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 данных МКВМ_2 результат составляет -50 нТл и -43 нТл для прогнозируемых МКВМ и не спрогнозированных соответственно. Для набора МКВМ_1 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.

Также было проведено сравнение результатов с моделью WSA-Enlil+Cone, широко используемой в мире в целях прогнозирования космической погоды. В статье [Wold и др., 2018] представлены результаты валидации онлайн-модели WSA-Enlil+Cone за период с марта 2010 г. по декабрь 2016 г.

2010-2016	система SMDC			WSA-Enlil+Cone (Wold et al., 2018)			
события	КВМ		МКВМ_2	Включения модели			
все	481		197				
τ	<i>Hits</i>	<i>False alarms</i>	<i>Misses</i>	<i>Hits</i>	<i>False alarms</i>	<i>Misses</i>	<i>Correct rejections</i>
30 h	145	336	83	121	180	106	1293

Таблица 18. Сравнение результатов работы нашей системы (SMDC) и онлайн-модели WSA-Enlil+Cone за период с марта 2010 г. по декабрь 2016 г.

В системе WSA-Enlil+Cone для определения параметров КВМ используются стереоскопический инструмент анализа КВМ (StereoCAT) и инструмент анализа КВМ NOAA (Национальное управление океанических и атмосферных исследований США) – CAT. Определенные таким образом параметры скорости и формы КВМ используются в качестве входных данных моделирования. За рассматриваемый период модель осуществила около 1800 симуляций КВМ (1800 включений) для прогнозирования прибытия КВМ на Землю или на космический аппарат STEREO. Для проверки модели используются данные о зарегистрированных МКВМ из базы данных DONKI и

других каталогов (каталог MKBM Ричардсона и Кейн, списком ISEST CME, каталогом Wind ICME). Значения параметров валидации рассчитываются для трех точек в гелиосфере – Земли, Stereo A и Stereo B. Результаты для Земли представлены в таблице 18 вместе с аналогичными результатами нашей системой (SMDC). Анализ проводится за период с июля 2010 года по декабрь 2016 года. В статье нет четкой информации о количестве MKBM, использованных для проверки. Для сравнения мы использовали список MKBM_2, который считаем аналогичным набору MKBM, использованному авторами статьи, основываясь на итоговом количестве событий MKBM и списке использованных ими источников.

Авторы этой работы рассчитывают hit, по количеству включений модели, когда моделирование предсказывало KBM, а также наблюдалось прибытие KBM, и ошибка прогноза составляла менее 30 часов. Аналогичная ситуация происходит и с параметром miss. В статье авторы рассчитывают параметр miss по количеству симуляций, в которых предсказано отсутствие прибытия KBM к Земле, в то время как MKBM наблюдался или если ошибка прогноза времени прихода KBM превышает 30 часов. В нашей работе мы определяем промах как не предсказанный MKBM. Поэтому эти результаты следует интерпретировать с осторожностью.

Система WSA-Enlil+Cone выдает 1293 правильных брака за рассматриваемый период. Эту величину можно сравнить с количеством KBM до отбора или на одном из этапов отбора (Таблица 16).

Сравнение наших данных с системой WSA-Enlil+Cone показывает, что наша модель работает аналогично в тот же период времени и с аналогичным набором MKBM, используемых для проверки. Соотношение hit/fa у WSA-Enlil+Cone лучше, но система SMDC в целом предсказала больше событий (Predicted).

4.2.3. Результаты прогноза скорости прихода

Мы также провели анализ точности прогноза средней скорости МКВМ (Таблица 19). Ошибка прогнозирования средней скорости МКВМ рассчитывалась по формуле 10.

	МКВМ_1	МКВМ_2	События различной геоэффективности (МКВМ_1)		
			III	II	I
$\langle dv \rangle$ (км/с)	21.6	8.7	-58.1	16.3	31.5
std (км/с)	129.9	122.3	97.8	131.4	126.6
СКО (км/с)	96.8	93.7	77.3	104.7	92.1

Таблица 19. Результаты анализа прогноза скорости прихода КВМ для различных выборок событий. МКВМ_1 - сравнение прогнозируемых событий с полным ОК МКВМ, МКВМ_2 – ОК МКВМ без учета событий из каталога ИКИ РАН. Подмножества МКВМ_1 отражают события различной геоэффективности: I – МКВМ вызвавшие геомагнитные возмущение с падением Dst до -50 нТл; II – от -50 до -100 нТл; III – падение Dst более чем на -100 нТл. Результаты приведены для $\tau = 48$ ч.

Сравнение точности прогнозирования скорости результатов прогноза КВМ с объединенным списком МКВМ, включающим и не включающим данные каталога ИКИ РАН, представлено в таблице 19. Сравнивая результаты выборок МКВМ_1 и МКВМ_2 можно сделать вывод, что средняя ошибка прогнозирования скорости больше для выборки МКВМ_1, что говорит о более сильном завышении прогнозируемой скорости относительно наблюдаемой. Точность прогнозирования скорости слабо зависит от τ : стандартного отклонения и СКО варьируется. менее чем на 10%. Средняя ошибка $\langle dv \rangle$ увеличивается с уменьшением τ : от 9 км/с для $\tau = 48$ ч. до 31 км/с за $\tau = 12$ ч (для выборки МКВМ_2). Это можно объяснить тем, что количество hit уменьшается с уменьшением τ , а при уменьшении количества событий тенденция к завышению прогнозируемой скорости становится более явной.

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 малыми и крупными геомагнитными возмущениями соответственно (см. Таблица 19).

4.2.4. Зависимость от солнечного цикла и геоэффективность

Параметры hit и fa не показывают какой-либо существенной связи с фазой солнечного цикла, в отличие от параметров, рассчитываемых относительно количества МКВМ (Predicted и Unpredicted). На рисунке (Рисунок 4.6 а) и б)) представлено сравнение количества hit и U, полученных за разные периоды времени и для разных значений τ .

Мы наблюдаем, что доля удачно предсказанных КВМ (hit) немного больше с 2016 по 2018 год, однако точность прогнозирования снижается, о чем свидетельствует количество событий, предсказанных с ошибкой $|dt|$ менее 24 часов.

Увеличение доли не предсказанных МКВМ с 2016 по 2018 год можно объяснить спецификой наблюдений диммингов в минимуме солнечной активности. Мы вернемся к этому в обсуждении.

Анализ способности системы прогнозировать МКВМ, связанные с различными уровнями геомагнитной возмущенности (см. Рисунок 4.6, с) и d)) показывает, что система более успешно прогнозирует МКВМ, связанные с высокими геомагнитными возмущениями ($Dst_{min} \leq -100$ нТл).). Данный анализ проводится для набора МКВМ_2. Доля МКВМ, связанных с сильными геомагнитными возмущениями, прогнозируемыми с ошибкой $|dt|$ менее 12 часов составляет 60% за весь период, 65% и 50% за периоды 2010–2015 и 2018–2018 годов соответственно. При увеличении толерантности к ошибкам τ

доля этих событий увеличивается до 75% за весь период и 87% за 2010-2015 гг.

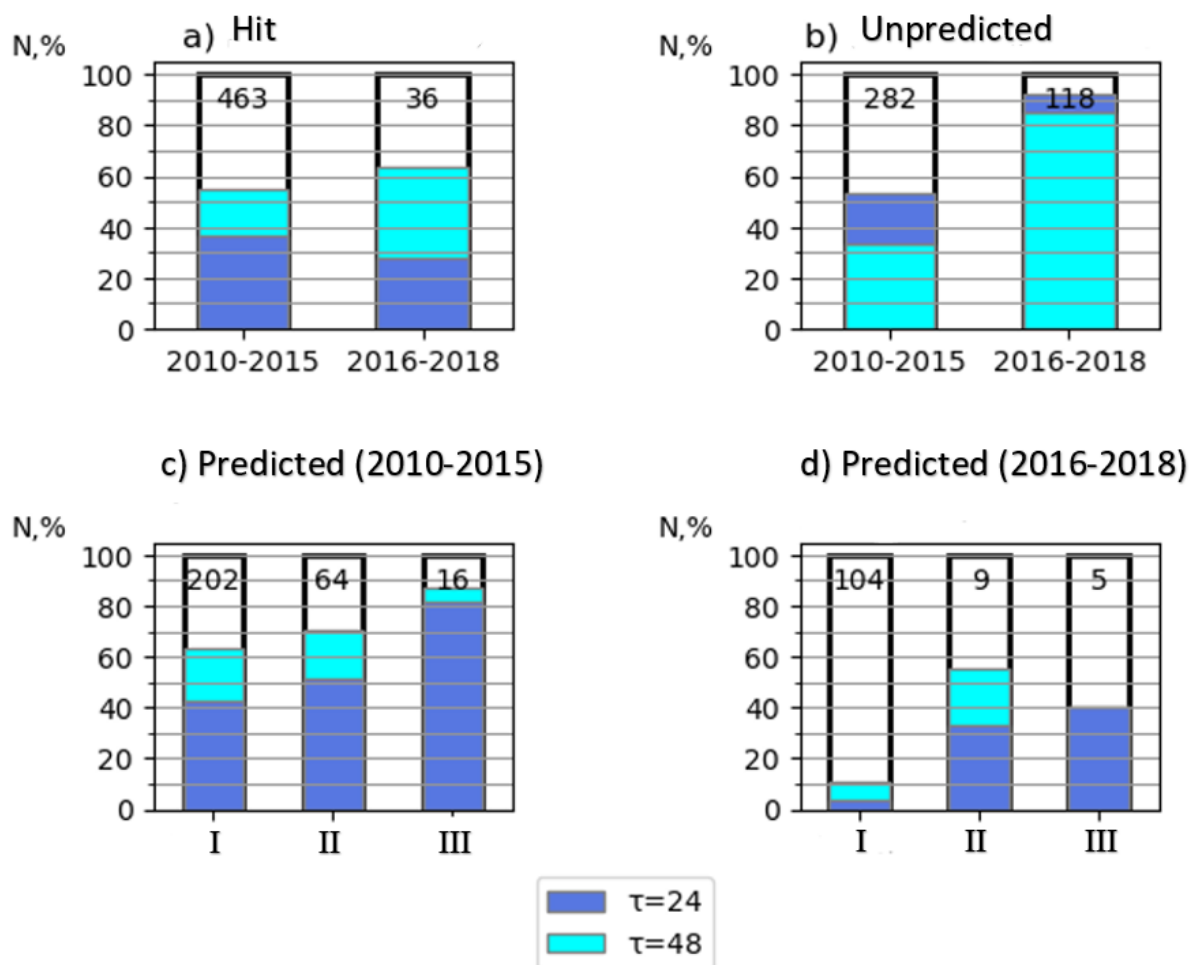


Рисунок 4.6 На панелях а) и б) изображена зависимость параметров Hit и Unpredicted от τ (синие столбцы для $\tau=24$ ч и голубые для $\tau=28$ ч). Панели с) и d) демонстрируют долю МКВМ, которые прогнозируются с допусками 24 (синий цвет) и 48 часов (голубой цвет) – параметр Predicted – для различных геомагнитных возмущений: I: $Dst_{min} > -50$ нТл; II: $-100 \text{ нТл} < Dst_{min} \leq -50 \text{ нТл}$; III: $Dst_{min} \leq -100 \text{ нТл}$). Количество событий, соответствующих 100%, в каждом столбце обозначается числом в верхней части столбца.

4.3. Особенности прогнозирования на спаде цикла солнечной активности

4.3.1. Отбор событий

Рассмотрим отдельно особенности прогнозирования на спаде цикла солнечной активности. Для этого был выбран период 2015–2017 годы. В 2015 годы

наблюдается ещё большое количество КВМ, которое быстро снижается в 2016 и 2017 году.

Количество КВМ	2015		2016		2017	
	N	%	N	%	N	%
CACTus	1730	100	922	100	580	100
Этап 0	1505	87	854	93	555	96
Этап 1	342	23	188	22	134	24
Этап 2	144	42	42	22	30	22
Этап 3	82	60	22	52	14	46
Nfin/Ni	5%		2%		2%	

Таблица 20. Количество событий КВМ отобранных системой как геоэффективных (посчитанное в шт. и в долях от количества на предыдущем этапе) на каждом этапе отбора в 2015, 2016 и 2017 годах. В последней строке указано отношение финального количества событий к изначальному.

Таблица 20 показывает, как количество событий изменялось после применения каждого этапа системы отбора геоэффективных событий в рассматриваемых годах. Для того, чтобы увидеть, как события отбираются на каждом этапе отдельно, доля отобранных событий посчитана для каждого этапа относительно предыдущего. В рассматриваемом периоде времени все фильтры отбирают события одинокого, за исключением Этапа 2, связанного с сопоставлением КВМ-димминг. В 2015 году доля отобранных событий равнялась 42%, в то время как в 2016–2017 годах она упала до 22%, что привело к уменьшению количества отобранных событий. Этап 3 также показывает зависимость от рассматриваемого года, однако так как количество рассматриваемых на Этапе 3 событий в 2016 и 2017 годах менее 50 шт., опираться на такие результаты сложно.

4.3.2. Результаты прогноза

Для более точной валидации в этой части работы события прогноза КВМ отдельно сопоставлялись с наблюдаемыми МКВМ из каталога по совпадению указанного в каталоге источника ОК МКВМ с прогнозируемым КВМ. В 2015 г. зарегистрировано 45 событий МКВМ, из них в 17 идентифицированы корональные источники по данным баз данных КВМ. Мы положительно предсказали 14 из этих 17 событий (82%), а для 100% предсказанных событий временная ошибка лежит в диапазоне ± 48 часов. В диапазоне ± 24 ч попадает прогноз 64% от всех событий, а в диапазоне ± 12 ч – 43% событий.

В случае, если корональный источник МКВМ не указан в каталогах МКВМ, но это событие было положительно предсказано с ошибкой менее ± 48 часов, мы рассматривали такое событие как удачно спрогнозированное. В 2015 г. в каталогах МКВМ было 28 событий с неизвестными корональными источниками. Мы смогли предсказать 17 из них с точностью ± 48 часов (61%). Временная ошибка лежит в диапазоне ± 24 ч для 59% прогнозируемых событий и в диапазоне ± 12 ч для 41% прогнозируемых событий. В тех случаях, когда в объединенном списке МКВМ не было событий со временем начала в пределах ± 48 часов от прогнозируемого времени прибытия КВМ, мы рассматривали этот КВМ как ложную тревогу, и событий определяло параметр f_a . В противоположном случае, когда не было предсказанных событий вблизи времени начала МКВМ в течение ± 48 часов, мы считали это событие промахом, и количество таких событий определяло параметр $miss$. Результаты для разных параметров успешности прогноза можно увидеть в таблице 21.

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 21. 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.

Результаты были сопоставлены с результатами, представленными в работе (Riley et al., 2018). В этой работе рассматриваются прогнозы прихода KBM, сделанные в реальном времени и поданные в систему CCMC CME Scoreboard различными научными группами. Авторы статьи пришли к выводу, что лучшие результаты прогноза за весь исследуемый период (2013-2018) получаются при усреднении прогнозов полученных различными моделями. Такой усредненный результат для каждого из событий получил название «Среднее по всем моделям» («Average of models» - AOM).

В таблице 22 представлено сравнение вероятностей успешного прогноза с выбранной точностью (в пределах ± 12 ч, ± 24 ч и ± 36 ч) в различные годы для системы SMDC и AOM CME Scoreboard. AOM показывает лучшие результаты в 2015 году, но в 2016 году SMDC прогноз более точен. В 2017 г. вероятность достижения точности в пределах ± 12 часов для этих методов одинакова. Средняя ошибка ($\langle dt \rangle$) за весь период 2015–2017 гг. равна 5 ч для SMDC и –9 ч для AOM. На рисунке (Рисунок 4.7) показано, что распределение ошибок времени прогнозируемым SMDC более симметрично.

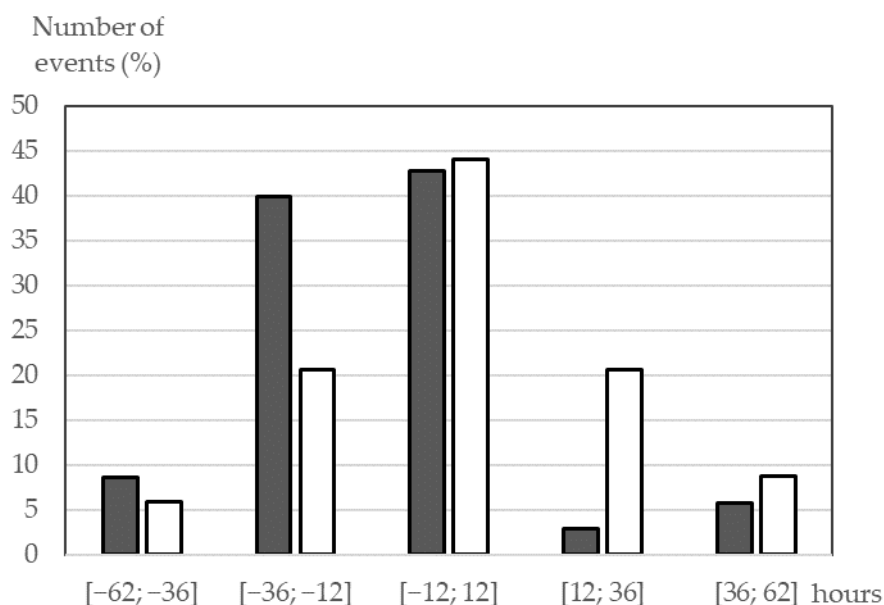


Рисунок 4.7. Распределение ошибок прогноза времени прихода МКВМ для событий 2015–2017 гг., предсказанных SMDC (белые столбцы) и CCMC Scoreboard (серые столбцы). По оси Y – количество событий в процентах от общего числа удачных прогнозов, а по оси X – интервал попадания ошибки в часах.

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 22. Вероятности прогноза МКВМ (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 таблице 23 показаны вероятности прогноза скорости МКВМ на 2015–2017 гг. Лучшие результаты были получены для 2016 года, а ошибки прогнозов скорости dv были наибольшими в 2017 году. Ошибка скорости dv оценивалась по формуле 10. Для оценки вероятности прогноза прихода КВМ с ошибкой

скорости менее указанного значения рассчитывалось количество событий, для которых $|dv| < dV_c$, где dV_c выбиралось равным 40, 80, 120 и 160 км/с. .

$dV_c, \text{ km s}^{-1}$	<40	<80	<120	<160
2015	19	51	68	81
2016	29	43	86	86
2017	0	0	40	80

Таблица 23. Вероятности прогноза МКВМ (в % от общего числа успешных прогнозов) в доверительных интервалах dV_c скорости прибытия на 2015–2017 гг. для базового SMDC.

4.4. Обсуждение результатов

Согласно таблице 21, в период с 2015 по 2017 гг. количество попаданий (hit) и ложных тревог (fa) снизилось, при этом число промахов (miss) возросло. Аналогичную картину отражают и значения, приведённые в скобках (отметим, что различие между 2016 и 2017 гг. во многом связано с малым числом событий, что снижает статистическую значимость усреднённых оценок). Данный эффект можно описать через соотношение числа прогнозируемых событий к количеству событий, зафиксированных в объединённой базе ICME. Эта величина известна как оценка смещения (*bias score*): значения, превышающие 1, указывают на тенденцию к завышению прогноза (прогнозируется больше событий, чем наблюдается), а значения меньше 1 — на тенденцию к его занижению (прогнозируется меньше событий, чем наблюдается). Показатель *bias score*, полученный из таблицы 21, меняется от 1,82 для 2015 г. до 0,61 для 2016 г. и, наконец, до значения 0,45 для 2017 г. Это означает, что, хотя количество указанных околоземных МКВМ постепенно уменьшается, количество источников КВМ, которые удовлетворяют условия алгоритма отбора геоэффективных событий, резко падает вместе со спадом солнечной активности (аналогичный вывод можно сделать из ременной зависимости – см. Рисунок 4.5). Это можно связать с работой Этапа 2 нашего

алгоритма. В 2016 и 2017 гг. количество обнаруженных диммингов заметно снизилось, так же, как и число КВМ, соответствующих критериям Этапа 2. В отдельные месяцы (декабрь 2016 г., февраль, март и май 2017 г., декабрь 2017 г.) фиксировалось лишь один-два димминга. В итоге доля событий, прошедших отбор после Этапа 3, по отношению к исходному числу событий САСТus в 2015 г. составила около 5%, тогда как в последующие годы — лишь около 2%, что отразилось на качестве прогноза. На Рисунок 4.8 приведено общее количество диммингов, зарегистрированных в базе Solar Demon, по годам. Из рисунка можно сделать вывод, что количество диммингов резко спадает после 2015 года.

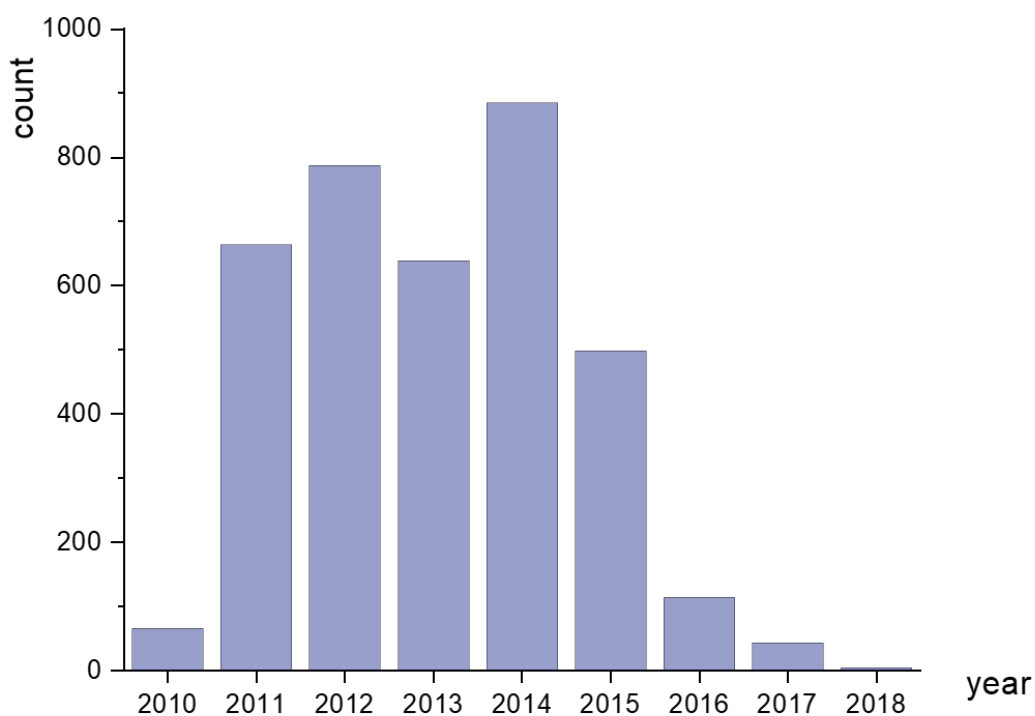


Рисунок 4.8. Количество диммингов зарегистрированных в базе Solar Demon по годам.

Вблизи максимальной фазы солнечного цикла возможно введение дополнительных этапов отбора по данным САСТus и Solar Demon, включая такие параметры, как площадь, интенсивность и координаты димминга, продолжительность КВМ и другие характеристики, что позволит сократить

число ложных тревог. Напротив, в периоды, близкие к солнечному минимуму, часть этапов отбора можно исключить, чтобы снизить количество промахов. Таким образом, варьирование параметров алгоритма в зависимости от фазы солнечного цикла представляется единственным реальным способом повышения качества прогноза.

Существуют и другие факторы, способные объяснить значительное число ложных срабатываний и промахов. При сравнении полученных нами результатов с данными CME Scoreboard AOM выявлены события, присутствующие в обоих прогнозах, но отсутствующие в каталогах MKBM. В то же время имели место события, не предсказанные ни одной из моделей, представленных в CME Scoreboard. Это указывает на то, что причины подобных ошибок носят общий характер для различных систем прогнозирования и связаны с особыми физическими процессами, влияющими на распространение KBM в гелиосфере. Например, 9 ноября 2015 г. в 14:00 UT на коронографе LASCO было зафиксировано событие, предсказанное как нами, так и тремя независимыми научными группами (Центр космических полётов Годдарда, Метеорологическое бюро Великобритании и NSSC CAS, Пекин, Китай). Однако, согласно данным Scoreboard, на Земле данный KBM обнаружен не был.

Одним из таких процессов, влияющих на распространение KBM в гелиосфере, является отклонение KBM от радиальной траектории. Этот процесс подробно обсуждается в работах [Prise и др., 2015; Wang и др., 2004; Wang и др., 2014]. В [Zhuang и др., 2017] предложена система, учитывающая эффект отклонения, что повышает вероятность успешного прогноза на 19%. В настоящее время система SMDC использует DBM в одномерном режиме, но мы планируем включить теорию отклонения в будущем. Кроме того, методом ансамблевого моделирования в работе [Shugay и др., 2022] было показано, что применение корректирующих коэффициентов к моделируемой скорости KCB и оптимизация γ могут заметно повысить точность прогнозирования.

Другой возможной причиной ложных тревог и пропусков может быть тип взаимодействия КВМ в солнечной короне, который меняет направление распространения КВМ. В работе [Gopalswamy и др., 2009] проанализировано влияние корональных дыр на распространение КВМ, которое может быть особенно сильным на спаде солнечной активности, когда наблюдается большое количество корональных дыр. В статьях [Kilpua и др., 2009; Sieyra и др., 2020] описаны различные случаи отклонения КВМ, вызванного фоновым магнитным полем. Множественные КВМ – также требуют особенного подхода к прогнозированию. Взаимодействие КВМ-КВМ может повлиять на точность прогноза и привести к неожиданно высокой геоэффективности события [Rodkin и др., 2018; Rodkin и др., 2019]. Например, в сентябре 2017 года были зафиксированы события с взаимодействием нескольких КВМ. В частности, одно событие произошло 4 сентября, а три других — 6 сентября, которые были выявлены с помощью нашего алгоритма отбора. В текущем исследовании влияние взаимодействия КВМ-КВМ на время прибытия и прогноз скорости не учитывалось. Тем не менее, такой учёт возможен с помощью модели DBM, если использовать скорость предыдущего КВМ в качестве фоновой скорости солнечного ветра для следующего выброса. Похожий метод обсуждался в работе [Temmer и др., 2012].

Кроме того, стоит отметить ещё одну причину появления ложных тревог и пропущенных МКВМ, связанную с вопросом идентификации плазмы, связанной с МКВМ, на орбите Земли. Каждая база данных или каталог МКВМ применяет собственные критерии для подтверждения связи параметров плазмы с конкретным МКВМ. В ряде работ показано, что некоторые МКВМ были зарегистрированы на орбите Земли, но не включены в каталоги, так как не соответствовали установленным критериям [Kilpua и др., 2012; Slemzin, Goryaev, Rodkin, 2022]. Такие события не очень геоэффективны и мощны, но мы должны принять их во внимание, чтобы правильно оценить наши методы

прогнозирования. В п. 3.2.2 этой главы как раз проанализировано влияние выбора опорного каталога МКВМ на валидацию результатов прогноза.

Глава 5. Использование прогноза КВМ для моделирования скорости солнечного ветра на орбите Земли¹

Целью данного исследования являлась интеграция результатов прогноза времени и скорости прихода корональных выбросов массы (КВМ) на околоземную орбиту с прогнозируемой по модели квазистационарных потоков (КСВ) скоростью солнечного ветра. В работе предпринята попытка объединить прогноз скорости по модели КСВ с прогнозом скорости КВМ для более точного моделирования вариаций скорости солнечного ветра.

5.1. Отбор событий для прогноза

Система SASTus автоматически определяет время начала коронального выброса массы (КВМ), его длительность, центральный угол, угол раствора конуса, в котором наблюдается КВМ, а также скорость выброса на основе анализа серии изображений коронографа LASCO/SOHO. Иногда алгоритм разбивает один КВМ типа гало или полу-гало на несколько узконаправленных потоков.

В работе были проанализированы события из каталога, произошедшие в период с 25 мая по 31 декабря 2010 года. За этот период автоматическая система SASTus зарегистрировала в общей сложности 380 событий. Для отбора событий был применен метод отбора, описанный в Главе 4. Здесь приведено его краткое описание.

Если несколько событий пересекались по времени и углам, они объединялись в один выброс с угловым раствором, равным объединению угловых растворов всех исходных событий, а скорость выбиралась как скорость выброса с

¹ При написании данной главы использовались материалы публикаций по теме диссертации 1 и 5, выполненных автором в соавторстве.

длительностью, превышающей остальные более чем в 1,5 раза. Если же длительности выбросов совпадали, для объединённого события рассчитывалась средняя скорость всех входящих КВМ. Длительность составного выброса определялась от времени начала первого до времени окончания последнего события. После применения данного алгоритма общее количество событий сократилось до 351.

Для выявления залимбовых событий использовалась база данных вспышек и диммингов Solar Demon (<http://solardemon.oma.be/>). Если КВМ связан с корональным источником на видимой стороне Солнца, то димминг можно зарегистрировать на фоне солнечного диска. В случае расположения источника на обратной стороне Солнца димминг либо не наблюдается, либо проявляется над лимбом.

Кроме того, димминги удобны для детектирования КВМ, связанных со вспышками или эрупцией протуберанцев на видимой стороне Солнца, которые не всегда надёжно фиксируются коронографом с позиции L1 [Kraaikamp, Verbeesk, 2015]. За рассматриваемый период димминги сопоставлялись с событиями КВМ из базы CACTus по времени начала события. Поскольку данные Solar Demon доступны с конца мая 2010 года, анализируемый интервал начинается с этого момента и охватывает остаток 2010 года, период роста активности 24-го солнечного цикла.

За этот период было зафиксировано 90 диммингов, из которых 38 не имели источников на видимой стороне Солнца (координаты диммингов находились за пределами солнечного диска). При этом 44 димминга удалось сопоставить с КВМ. Наблюдение димминга на солнечном диске, связанного с КВМ, происходит раньше, чем регистрация самого КВМ в коронографе. КВМ считался соответствующим диммингу, если он регистрировался в коронографе LASCO не позднее чем через два часа после наблюдения димминга. Таким образом 44 диммингам соответствовали 51 КВМ.

Из этих диммингов 23 события были залимбовыми, а 24 соответствующих им KBM были исключены из выборки как не геоэффективные, то есть с высокой вероятностью не направленные в сторону Земли. Оставшимся 21 диммингам соответствовали 27 KBM. Из 46 диммингов, которым не удалось найти подходящих KBM, 15 были залимбовыми, а 31 оставались потенциальными источниками KBM.

Следует отметить, что димминг может наблюдаться на изображениях Солнца, в то время как соответствующий KBM может не регистрироваться коронографом. Это может быть связано с перерывами и сбоями в работе инструмента LASCO, а также с тем, что димминг обусловлен не выбросом, а неэруптивной корональной структурой, либо вызван флуктуациями параметров плазмы, связанными с мощными вспышками и выбросами, произошедшими на обратной стороне Солнца.

В качестве дополнительного источника данных по KBM использовалась база SEEDS LASCO (<http://spaceweather.gmu.edu/seeds/lasco.php>). Эта база также обновляется в режиме, близком к реальному времени, и содержит основную информацию о параметрах KBM: дату и время начала события, центральный угол, угол раствора конуса, скорость и ускорение выброса. Алгоритм детектирования KBM в SEEDS основан на автоматической обработке изображений коронографа LASCO, как и в CACTus, однако различия в алгоритмах приводят к отличиям в количестве зарегистрированных KBM. В Главе 2 уже обсуждались преимущества и недостатки баз CACTus и SEEDS, здесь же база SEEDS используется как дополнительная.

Таким образом, для поиска KBM, соответствующих диммингам, которые не были сопоставлены с событиями базы CACTus, мы использовали базу SEEDS. Из 31 димминга, не сопоставленного с CACTus, 6 связаны с пропусками в данных, 6 совпали с KBM из базы SEEDS LASCO, а 3 были обнаружены в базе CACTus FLOW — списке событий с параметрами, не удовлетворяющими

критериям полноценного KBM и классифицируемых как «подозрительные» регистрации. Итоговый набор KBM составил 115 событий.

Далее был выполнен отбор событий по углу раствора ($\delta\alpha$) и центральному углу ($\delta\alpha$): из полярных выбросов исключались те, у которых угол раствора был меньше 60° , из экваториальных — менее 30° . После фильтрации осталось 94 KBM из баз данных, для которых производился прогноз скорости и времени прибытия соответствующих MKBM на орбиту Земли.

5.2. Входные параметры модели

Параметры модели DBM рассчитывались аналогично предыдущему исследованию: скорость и время наблюдения выброса на расстоянии 5 солнечных радиусов брались из базы данных CACTus (LASCO C2) и пересчитывались на расстояние 20 солнечных радиусов в предположении равномерного распространения. Параметр γ рассчитывался по формуле

$$88 \quad \gamma = \begin{cases} 0.5 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}, & \text{при } v_0 < 500 \frac{\text{км}}{\text{с}} \\ 0.2 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}, & \text{при для } 500 \frac{\text{км}}{\text{с}} \leq v_0 < 1000 \frac{\text{км}}{\text{с}} \\ 0.1 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}, & \text{при } v_0 \geq 1000 \frac{\text{км}}{\text{с}} \end{cases}$$

, скорость фонового ветра рассчитывалась по модели KCB.

Коэффициенты модели KCB были оптимизированы посредством минимизации ошибок прогнозирования на рассматриваемом периоде и принимали значения: $A_i = 210$ и 190 и $\alpha_i = 0.4$ и 0.5 , соответственно для длин волн 19.3 и 21.1 нм.

Поскольку скорость фонового ветра, по которому распространяется KBM, может изменяться при движении от 20 солнечных радиусов до 1 а.е., модель DBM применялась поэтапно. Параметры DBM и модели KCB обновлялись в нескольких ключевых точках гелиосферы — на расстояниях 20, 65, 115 и 165 солнечных радиусов. В каждой из этих точек пересматривались значения скорости фонового солнечного ветра и параметра γ .

5.3. Профиль скорости КВМ

Для каждого КВМ в базах данных указана длительность его наблюдения в коронографе, что позволяет оценить продолжительность воздействия соответствующего МКВМ на орбите Земли. Таким образом, прогноз строился не для одной точки времени, а для множества точек, охватывающих часы длительности МКВМ. На данном этапе работы не учитывалось взаимодействие между несколькими КВМ, распространяющимися одновременно в гелиосфере, а также не анализировалась структура МКВМ на околоземной орбите — прогнозировались лишь время прихода, длительность воздействия и скорость МКВМ.

В работе [Temmer и др., 2017] было показано, что фоновому солнечному ветру требуется от 2 до 5 дней на восстановление после прохождения МКВМ, что существенно превышает среднюю продолжительность самого МКВМ (~1.3 дня). В настоящем исследовании мы моделировали воздействие МКВМ на фоновый солнечный ветер, учитывая, что оно продолжается некоторое время после прогнозируемого момента прихода МКВМ на околоземную орбиту.

Если одновременно на орбиту приходило несколько МКВМ с различными скоростями, их скорости усреднялись (см. верхний график на Рисунок 5.1). Временной интервал от 12 часов до 12 часов после прогнозируемого времени прихода МКВМ рассматривался как период наблюдения МКВМ с прогнозируемой скоростью, а интервал от 12 до 48 часов после — как область с остаточными следами воздействия МКВМ на фоновый солнечный ветер.

В рамках упрощённого подхода влияние МКВМ на фоновый солнечный ветер рассчитывалось как усреднение прогнозируемых скоростей МКВМ и фонового ветра. На нижнем графике (Рисунок 5.1) представлен прогноз скорости солнечного ветра, полученный путем объединения прогноза скорости ВСП, основанного на площади корональных дыр, с прогнозом скорости МКВМ, рассчитанным с помощью модели DBM.

5.4. Результаты моделирования

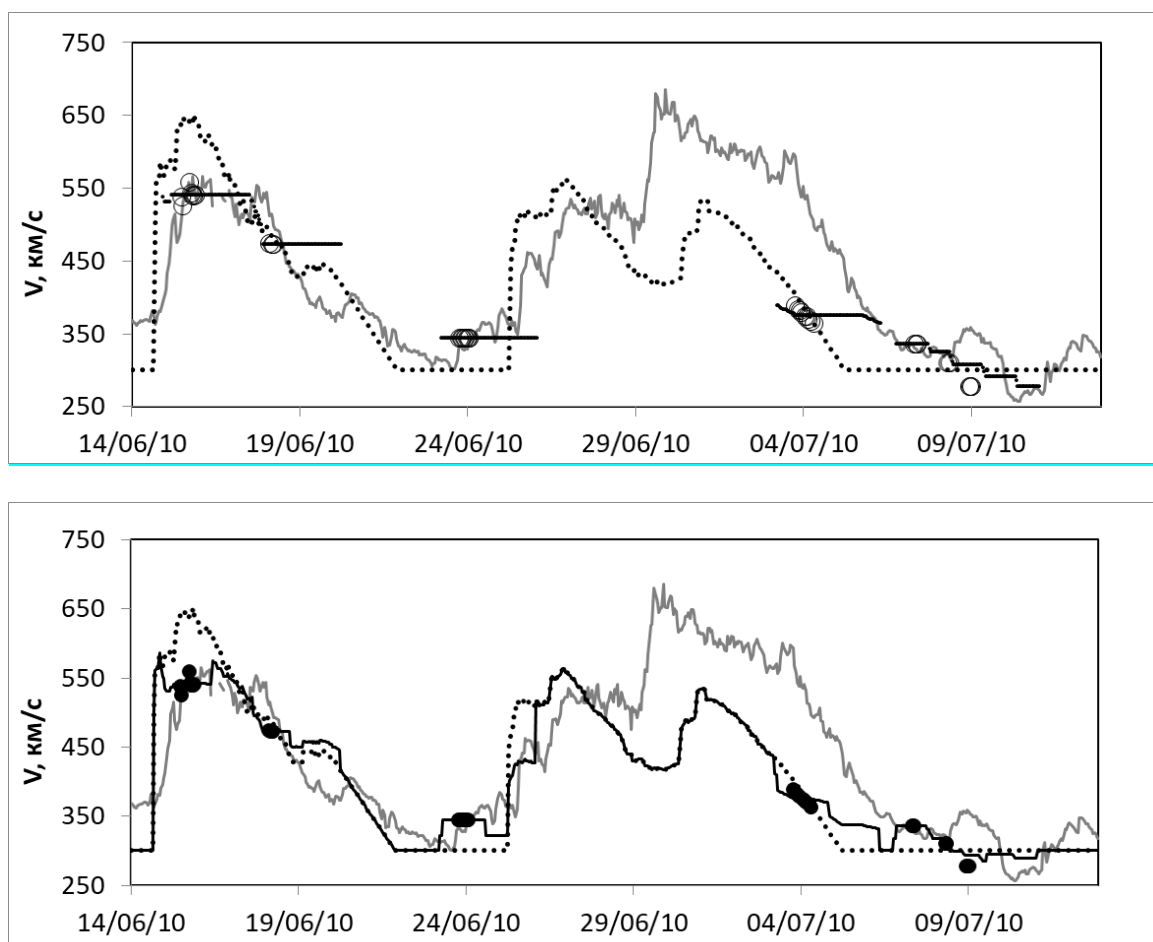


Рисунок 5.1. Серая кривая — наблюдаемая скорость солнечного ветра (СВ) по данным КА ACE. Черная пунктирная кривая — прогноз скорости ВСП СВ, построенный на основе площадей корональных дыр. Черные кружки обозначают моменты прихода и скорости МКВМ. На верхнем графике черные вертикальные линии показывают временные интервалы влияния МКВМ на фоновый СВ, в течение которых рассчитываются усреднённые скорости между прогнозом ВСП и МКВМ. На нижнем графике черная сплошная кривая представляет совместный прогноз скорости солнечного ветра, объединяющий данные ВСП из корональных дыр и прогноз МКВМ.

За весь период с мая 2010 по декабрь 2010 было отобрано 94 КВМ, при этом большинство из событий обладало скоростью менее 400 км/с (по данным коронографа) – 69% против 31%. Средняя скорость рассматриваемых событий составила 331 ± 188 км/с, что говорит о том, что значительная часть моделируемых потоков представляет собой медленные КВМ, которые ускоряются в гелиосфере. На рисунке (Рисунок 5.2) показана гистограмма

распределения скоростей КВМ, определённых по данным коронографа в САСТus, черными бинами, а распределение спрогнозированной скорости – черными бинами. Из рисунка можно сделать вывод, что разброс скоростей уменьшается. Согласно DBM скорости стремятся к фоновой скорости, варьирующейся по большей части от 300–500 км/с. Было получено, что из всех КВМ в процессе распространения 65% ускоряются фоновым ветром.

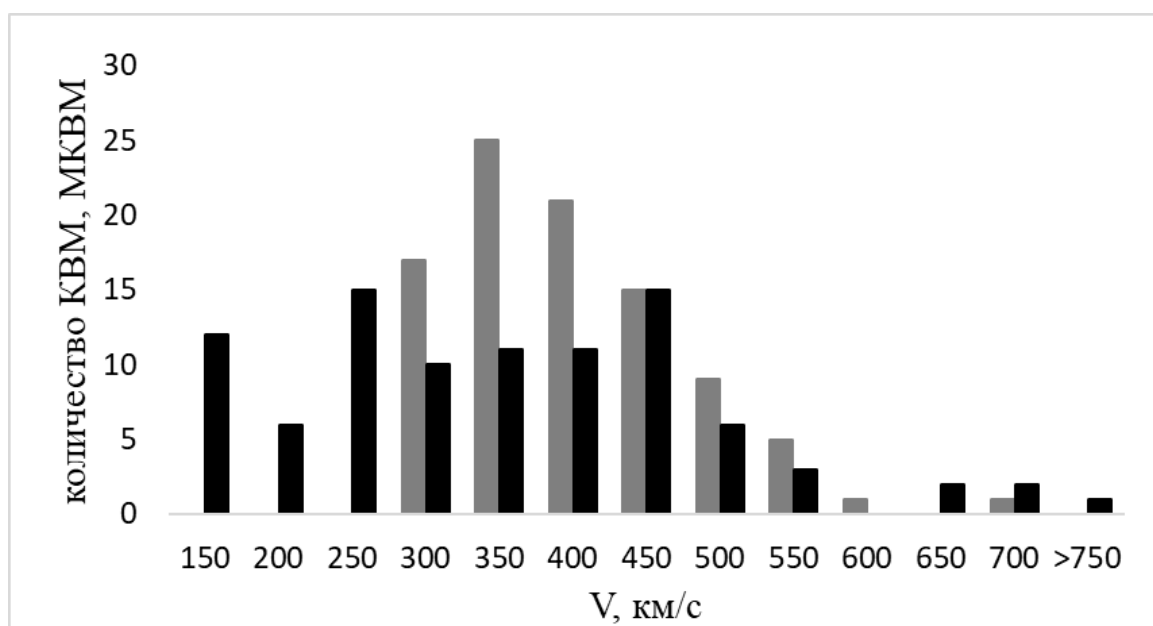


Рисунок 5.2. Гистограмма распределений по скоростям КВМ ($V_{\text{квм}}$: черные столбцы) и МКВМ ($V_{\text{мквм}}$: серые столбцы).

На рисунке (Рисунок 5.3) показана зависимость начальной скорости КВМ от разности между конечной (модельной) и начальной скоростью выброса. По оси X отрицательные значения соответствуют замедлившимся КВМ с начальными скоростями преимущественно выше 400 км/с, тогда как положительные значения характеризуют ускорившиеся КВМ с начальными скоростями ниже 400 км/с.

В таблице 24 приведены итоговые параметры прогноза скорости солнечного ветра по сравнению с наблюдаемой скоростью (КА ACE). В варианте без учета КВМ прогноз рассчитывался по модели КСВ, а моменты отсутствия КД заполнялись постоянной скоростью 300 км/с. Анализ данных показывает, что среднеквадратичная ошибка прогноза при таком подходе выше для

высокоскоростных потоков (108 км/с против 75 км/с), однако коэффициент корреляции в этих случаях также выше (0.51 против 0.23), что свидетельствует о более точном учёте динамики высокоскоростных потоков. Для сравнения, в предыдущих исследованиях среднеквадратичная ошибка прогноза модели WSA на три суток вперёд для фазы роста 23-го солнечного цикла (1998–1999 гг.) составляла порядка 90 км/с.[Owens и др., 2005]. При учёте КВМ общая среднеквадратичная ошибка прогноза уменьшается с 91 км/с до 86 км/с, а коэффициент корреляции возрастает с 0.55 до 0.6, что свидетельствует о улучшении качества прогноза за счёт интеграции влияния корональных выбросов массы.

	Прогноз скорости СВ по КСВ без КВМ			Прогноз скорости СВ по КСВ с учетом КВМ		
	все потоки	>400 км/с	<400 км/с	все потоки	>400 км/с	<400 км/с
СКО	91	108	75	86	109	60
КК	0.55	0.51	0.23	0.6	0.51	0.29

Таблица 24. Параметры качества прогноза скорости солнечного ветра с учетом и без учета КВМ. СКО-среднеквадратичная ошибка. КК – коэффициент корреляции.

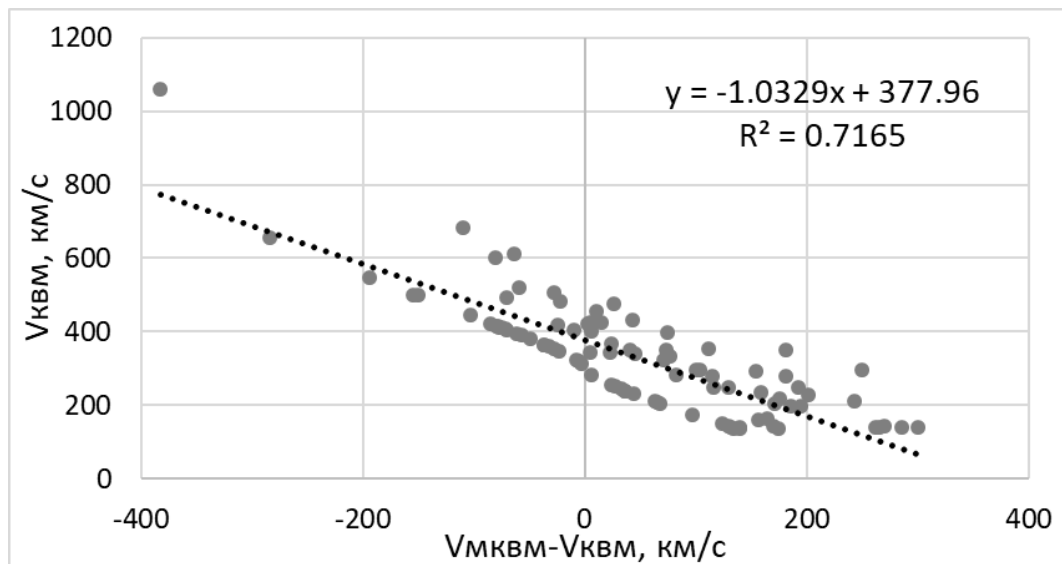


Рисунок 5.3. Соотношение измеренной на коронографе SOHO/LASCO скорости KBM с разностью между скоростями, спрогнозированной ($V_{\text{мквм}}$) и наблюдаемой в коронографе ($V_{\text{квм}}$)

5.5. Выводы

Разработана модель прогноза скорости потоков солнечного ветра, включающая прогноз скорости квазистационарных (фоновых) потоков СВ по модели КСВ и дополненный прогноз скорости МКВМ, рассчитанный с использованием DBM. В рамках принятых модельных допущений данный прогноз демонстрирует результаты, сопоставимые с другими моделями, функционирующими в режиме, близком к реальному времени. На примере 2010 года показано, что добавление прогноза МКВМ к прогнозу фоновому СВ повышает точность общего прогноза скорости солнечного ветра на околоземной орбите: среднеквадратичное отклонение между измеренными и спрогнозированными значениями скорости снижается с 91 до 86 км/с, а коэффициент корреляции возрастает с 0.55 до 0.6. Большинство выбранных из базы данных KBM, распространяющихся по спрогнозированному фоновому ветру, формируют медленные и негеоэффективные потоки солнечного ветра: 67 % всех МКВМ достигли околоземной орбиты со скоростями менее 400 км/с, а 90 из 94 МКВМ соответствовали спокойной геомагнитной обстановке ($Dst > -30$ нТл).

Учет медленных КВМ также имеет большое значение для космической погоды, так как при взаимодействии с ВСП, такие выбросы могут снижать скорость ВСП и уменьшать их геоэффективность. Быстрые потоки солнечного ветра, в том числе коротирующие потоки из долгоживущих корональных дыр, обычно вызывают более слабые геомагнитные возмущения по сравнению с мощными КВМ. Однако такие события могут сопровождаться длительными суббуревыми возмущениями. Это 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]. Кроме того, наблюдается формирование 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.

Заключение

В работе предложен и реализован подход к прогнозированию прихода КВМ с учетом переменного солнечного ветра, позволяющий моделировать взаимодействие выбросов с высокоскоростными потоками и оценивать изменение их скорости и времени прибытия к Земле. Возможность учета влияния высокоскоростных потоков по мере распространения КВМ открывает перспективы для более глубокого изучения физики этого взаимодействия и повышения качества прогноза.

Разработан автоматический алгоритм отбора потенциально геоэффективных событий из открытых баз данных CACTus и Solar Demon, дополненный методом сопоставления КВМ с диммингами для уточнения параметров, включая залимбовые события. Такой алгоритм предложен впервые и по эффективности сопоставим с ручными методами отбора. Система способна работать в режиме, близком к реальному времени, и адаптироваться к фазам солнечного цикла за счет настройки параметров отбора.

Для валидации методов и оценки точности прогнозов создан Объединенный Каталог МКВМ за 2010–2018 гг., содержащий расширенную информацию о параметрах выбросов и геомагнитной обстановке. Этот каталог объединяет данные из широко используемых источников, что дает возможность анализировать зависимость качества прогноза от валидационного набора.

В рамках работы реализована комбинированная модель прогноза скорости солнечного ветра, включающая расчет квазистационарных потоков по модели КСВ и добавление скоростей МКВМ по модели DBM. Учет прогноза КВМ позволил снизить среднеквадратичное отклонение между измеренными и спрогнозированными потоками с 91 до 86 км/с и повысить коэффициент корреляции с 0,55 до 0,6.

Полученные результаты имеют как практическое, так и научное значение. С практической точки зрения, они могут быть использованы для

совершенствования систем оперативного прогноза космической погоды и интеграции в комплексные прогнозные сервисы. Достигнутые значения ошибок прогнозов сопоставимы с результатами, получаемыми в других современных исследованиях. С научной точки зрения предложенные методы и разработанные инструменты создают основу для дальнейшего исследования взаимодействия КВМ с высокоскоростными потоками солнечного ветра, уточнения моделей распространения выбросов в межпланетной среде, изучения связи корональных выбросов масс и диммингов и разработке методов идентификации геоэффективных КВМ на стадии их коронального распространения.

Литература

1. Ширяев А. О., Капорцева К. Б. Анализ различий каталогов межпланетных корональных выбросов массы и создание объединенного каталога // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2023. Т. 4.
2. Abunina M. A. и др. On the features of great Forbush effect during May 2024 extreme geomagnetic storm // Advances in Space Research. 2025.
3. Amerstorfer T. и др. Evaluation of CME Arrival Prediction Using Ensemble Modeling Based on Heliospheric Imaging Observations // Space Weather. 2021. Т. 19. № 1.
4. Arge O. N., Pizzo V. J. Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates // J Geophys Res Space Phys. 2000. Т. 105. № A5.
5. Brueckner G. E. и др. Geomagnetic storms caused by coronal mass ejections (CMEs): March 1996 through June 1997 // Geophys Res Lett. 1998. Т. 25. № 15.
6. 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.
7. Cargill P. J. On the Aerodynamic Drag Force Acting on Interplanetary Coronal Mass Ejections // Sol Phys. 2004. Т. 221. № 1. С. 135–149.
8. Chi Y. и др. Statistical Study of the Interplanetary Coronal Mass Ejections from 1995 to 2015 // Sol Phys. 2016. Т. 291. № 8. С. 2419–2439.
9. Chikunova G. и др. Coronal Dimmings Associated with Coronal Mass Ejections on the Solar Limb // Astrophys J. 2020. Т. 896. № 1. С. 17.

10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Dumbović M. и др. The Drag-based Ensemble Model (DBEM) for Coronal Mass Ejection Propagation // *Astrophys J.* 2018. Т. 854. № 2. С. 180.
14. 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.
15. Gopalswamy N. и др. CME interactions with coronal holes and their interplanetary consequences // *J Geophys Res Space Phys.* 2009. Т. 114. № 3.
16. Gosling J. T. Coronal mass ejections and magnetic flux ropes in interplanetary space, 1990. С. 343–364.
17. 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.
18. 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.
19. Harra L. K., Sterling A. C. Material Outflows from Coronal Intensity “Dimming Regions” during Coronal Mass Ejection Onset // *Astrophys J.* 2001. Т. 561. № 2.

20. Hess P., Zhang J. A Study of the Earth-Affecting CMEs of Solar Cycle 24 // Sol Phys. 2017. T. 292. № 6.
21. Hinterreiter J. и др. Drag-Based CME Modeling With Heliospheric Images Incorporating Frontal Deformation: ELEvoHI 2.0 // Space Weather. 2021. T. 19. № 10.
22. Jian L. и др. Properties of interplanetary coronal mass ejections at one AU during 1995 - 2004 // Sol Phys. 2006. T. 239. № 1–2. С. 393–436.
23. 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. T. 54. № 3. С. 517–527.
24. Kaportseva K. и др. CME Forecasting System: Event Selection Algorithm, Dimming Data Application Limitations, and Analysis of the Results for Events of the Solar Cycle 24 // Universe. 2024. T. 10. № 8. С. 321.
25. 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. 2021. T. 59. № 4.
26. Kay C. и др. USING ForeCAT DEFLECTIONS AND ROTATIONS TO CONSTRAIN THE EARLY EVOLUTION OF CMEs // Astrophys J. 2016. T. 827. № 1.
27. Kay C., Mays M. L., Verbeke C. Identifying Critical Input Parameters for Improving Drag-Based CME Arrival Time Predictions // Space Weather. 2020. T. 18. № 1.
28. Kilpua E. K. J. и др. STEREO observations of interplanetary coronal mass ejections and prominence deflection during solar minimum period // Ann Geophys. 2009. T. 27. № 12.
29. Kilpua E. K. J. и др. Observations of ICMEs and ICME-like Solar Wind Structures from 2007-2010 Using Near-Earth and STEREO Observations // Sol Phys. 2012. T. 281. № 1.

30. Kilpua E. K. J. и др. Properties and drivers of fast interplanetary shocks near the orbit of the Earth (1995–2013) // *J Geophys Res Space Phys.* 2015. Т. 120. № 6. С. 4112–4125.
31. Kilpua E., Koskinen H. E. J., Pulkkinen T. I. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space // *Living Rev Sol Phys.* 2017. Т. 14. № 1.
32. 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.
33. 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.
34. Lepping R. P., Jones J. A., Burlaga L. F. Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU // *J Geophys Res.* 1990. Т. 95. № A8.
35. 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.
36. 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.
37. López F. M. и др. Estimating the mass of CMEs from the analysis of EUV dimmings // *Astron Astrophys.* 2019. Т. 627.
38. Mays M. L. и др. Ensemble Modeling of CMEs Using the WSA–ENLIL+Cone Model // *Sol Phys.* 2015. Т. 290. № 6. С. 1775–1814.
39. 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.

40. Odstrčil D., Pizzo V. J. Three-dimensional propagation of coronal mass ejections (CMEs) in a structured solar wind flow: 2. CME launched adjacent to the streamer belt // *J Geophys Res Space Phys.* 1999. T. 104. № A1.
41. Olmedo O. и др. Automatic detection and tracking of coronal mass ejections in coronagraph time series // *Solar Physics.* , 2008. С. 485–499.
42. Owens M. J. и др. An event-based approach to validating solar wind speed predictions: High-speed enhancements in the Wang-Sheeley-Arge model // *J Geophys Res Space Phys.* 2005. T. 110. № A12.
43. Palmerio E. и др. CMEs and SEPs During November–December 2020: A Challenge for Real-Time Space Weather Forecasting // *Space Weather.* 2022. T. 20. № 5.
44. Paouris E. и др. Assessing the Projection Correction of Coronal Mass Ejection Speeds on Time-of-Arrival Prediction Performance Using the Effective Acceleration Model // *Space Weather.* 2021. T. 19. № 2.
45. Poedts S. и др. EUropean Heliospheric FORecasting Information Asset 2.0 // *Journal of Space Weather and Space Climate.* 2020. T. 10.
46. Pomoell J., Poedts S. EUHFORIA: European heliospheric forecasting information asset // *Journal of Space Weather and Space Climate.* 2018. T. 8.
47. Prise A. J. и др. Analysis of a coronal mass ejection and corotating interaction region as they travel from the Sun passing Venus, Earth, Mars, and Saturn // *J Geophys Res Space Phys.* 2015. T. 120. № 3.
48. Richardson I. G., Cane H. V. Near-earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996 - 2009): Catalog and summary of properties // *Sol Phys.* 2010. T. 264. № 1. С. 189–237.
49. Richardson I. G., Cane H. V. Near-earth solar wind flows and related geomagnetic activity during more than four solar cycles (1963-2011) // *Journal of Space Weather and Space Climate.* 2012. T. 2.

50. 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.
51. Robbrecht E., Berghmans D. Automated recognition of coronal mass ejections (CMEs) in near-real-time data // *Astron Astrophys*. 2004. Т. 425. № 3.
52. Rodkin D. и др. Single ICMEs and Complex Transient Structures in the Solar Wind in 2010 – 2011 // *Sol Phys*. 2018. Т. 293. № 5.
53. Rodkin D. G. и др. Large-Scale and Small-Scale Solar Wind Structures Formed during Interaction of Streams in the Heliosphere // *Cosmic Research*. 2019. Т. 57. № 1.
54. 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.
55. Rollett T. и др. ElEvoHI: 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.
56. Scolini C. и др. CME–CME Interactions as Sources of CME Geoeffectiveness: The Formation of the Complex Ejecta and Intense Geomagnetic Storm in 2017 Early September // *Astrophys J Suppl Ser*. 2020. Т. 247. № 1. С. 21.
57. 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.
58. Shlyk N. S. и др. Forbush decreases caused by paired interacting solar wind disturbances // *Mon Not R Astron Soc*. 2022. Т. 511. № 4.
59. Shlyk N. S. и др. An Empirical Model for Estimating the Velocities and Delays of Interplanetary Coronal Mass Ejections // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2023. Т. 63. № 5. С. 564–573.

60. Shugay Y. и др. Modeling of Solar Wind Disturbances Associated with Coronal Mass Ejections and Verification of the Forecast Results // Universe. 2022. Т. 8. № 11.
61. 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.
62. 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. 2021. Т. 61. № 2.
63. Shugay Yu. S. и др. Hierarchical approach to forecasting recurrent solar wind streams // Solar System Research. 2011. Т. 45. № 6. С. 546–556.
64. Sieyra M. V. и др. Analysis of Large Deflections of Prominence–CME Events during the Rising Phase of Solar Cycle 24 // Sol Phys. 2020. Т. 295. № 9.
65. Sindhuja G. и др. Modeling a Coronal Mass Ejection as a Magnetized Structure with EUHFORIA // Astrophys J. 2022. Т. 925. № 1.
66. Slemzin V., Goryaev F., Rodkin D. Formation of Coronal Mass Ejection and Posteruption Flow of Solar Wind on 2010 August 18 Event // Astrophys J. 2022. Т. 929. № 2. С. 146.
67. Suresh K. и др. Study of Interplanetary CMEs/Shocks During Solar Cycle 24 Using Drag-Based Model: The Role of Solar Wind // Sol Phys. 2019. Т. 294. № 4. С. 47.
68. 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.
69. Temmer M. и др. Influence of the ambient solar wind flow on the propagation behavior of interplanetary coronal mass ejections // Astrophysical Journal. 2011. Т. 743. № 2.

70. Temmer M. и др. Characteristics of kinematics of a coronal mass ejection during the 2010 August 1 CME-CME interaction event // *Astrophysical Journal*. 2012. Т. 749. № 1.
71. Temmer M. и др. Preconditioning of Interplanetary Space Due to Transient CME Disturbances // *Astrophys J*. 2017. Т. 835. № 2.
72. Temmer M. и др. CME propagation through the heliosphere: Status and future of observations and model development // *Advances in Space Research*. 2023.
73. 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.
74. Tucker-Hood K. и др. Validation of a priori CME arrival predictions made using real-time heliospheric imager observations // *Space Weather*. 2015. Т. 13. № 1. С. 35–48.
75. 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.
76. Verbeke C. и др. Benchmarking CME Arrival Time and Impact: Progress on Metadata, Metrics, and Events // *Space Weather*. 2019. Т. 17. № 1. С. 6–26.
77. Verbeke C. и др. Quantifying errors in 3D CME parameters derived from synthetic data using white-light reconstruction techniques // *Advances in Space Research*. 2023. Т. 72. № 12. С. 5243–5262.
78. Vourlidas A. и др. Comprehensive analysis of coronal mass ejection mass and energy properties over a full solar cycle // *Astrophysical Journal*. 2010. Т. 722. № 2.
79. Vourlidas 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. T. 377. № 2148.
80. Vršnak B. Forces governing coronal mass ejections // Advances in Space Research. 2006a. T. 38. № 3. C. 431–440.
 81. Vršnak B. Forces governing coronal mass ejections // Advances in Space Research. 2006b. T. 38. № 3. C. 431–440.
 82. Vrsnak B. и др. The role of aerodynamic drag in propagation of interplanetary coronal mass ejections // Astron Astrophys. 2010. T. 512. № 6.
 83. Vršnak B. и др. Propagation of Interplanetary Coronal Mass Ejections: The Drag-Based Model // Sol Phys. 2013. T. 285. № 1–2. C. 295–315.
 84. Wang Y. и др. Deflection of coronal mass ejection in the interplanetary medium // Sol Phys. 2004. T. 222. № 2. C. 329–343.
 85. Wang Y. и др. Deflected propagation of a coronal mass ejection from the corona to interplanetary space // J Geophys Res Space Phys. 2014. T. 119. № 7. C. 5117–5132.
 86. Wang Y. и др. CME Arrival Time Prediction Using Convolutional Neural Network // Astrophys J. 2019. T. 881. № 1. C. 15.
 87. Wang Y.-M., Sheeley N. R. , Jr. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion // Astrophys J. 1990. T. 355.
 88. Wang Y.-M., Sheeley N. R. , Jr. On potential field models of the solar corona // Astrophys J. 1992. T. 392.
 89. Webb D. F., Howard T. A. Coronal Mass Ejections: Observations // Living Rev Sol Phys. 2012. T. 9. C. 3.
 90. Wimmer-Schweingruber R. F. и др. Understanding interplanetary coronal mass ejection signatures: Report of working group B // Space Sci Rev. 2006. T. 123. № 1–3.

91. Wold A. M. и др. Verification of real-time WSA-ENLIL+Cone simulations of CME arrival-time at the CCMC from 2010 to 2016 // Journal of Space Weather and Space Climate. 2018. Т. 8.
92. Wood B. E. и др. A STEREO Survey of Magnetic Cloud Coronal Mass Ejections Observed at Earth in 2008–2012 // Astrophys J Suppl Ser. 2017. Т. 229. № 2.
93. Xie H. Cone model for halo CMEs: Application to space weather forecasting // J Geophys Res. 2004. Т. 109. № A3. С. A03109.
94. 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.
95. Yermolaev Y. I. и др. Catalog of large-scale solar wind phenomena during 1976-2000 // Cosmic Research. 2009. Т. 47. № 2. С. 81–94.
96. 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.
97. Zelenyi L. M. и др. Current Structures with Magnetic Shear in Space Plasma // JETP Lett. 2018. Т. 108. № 8. С. 557–569.
98. Zhao X., Dryer M. Current status of CME/shock arrival time prediction // Space Weather. 2014. Т. 12. № 7. С. 448–469.
99. Zhuang B. и др. The Significance of the Influence of the CME Deflection in Interplanetary Space on the CME Arrival at Earth // Astrophys J. 2017. Т. 845. № 2. С. 117.
100. 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.

101. Zurbuchen T. H., Richardson I. G. In-situ solar wind and magnetic field signatures of interplanetary coronal mass ejections // Space Sci Rev. 2006. T. 123. № 1–3.