

На правах рукописи



Березин Иван Александрович

**ПРОГНОЗ СКОРОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО ДАННЫМ  
НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА**

Специальность 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН» (ГАО РАН)

**Научный руководитель:**

Тлатов Андрей Георгиевич,  
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Горной астрономической станции (Кисловодск) Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук» (ГАО РАН)

**Официальные оппоненты:**

Обридко Владимир Нухимович,  
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий гелиофизической лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук» (ИЗМИРАН)

Куценко Александр Сергеевич,  
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Отдела физики Солнца и Солнечной системы Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Крымская астрофизическая обсерватория РАН» (КрАО РАН)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт прикладной геофизики. имени академика Е. К. Федорова» (ИПГ)

Защита состоится 26 апреля 2024 г. в 11 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.021.01 при Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ГАО РАН ([http://www.gaoran.ru/wp-content/uploads/2023/12/Dissertatsia\\_Berezin.pdf](http://www.gaoran.ru/wp-content/uploads/2023/12/Dissertatsia_Berezin.pdf)).

Автореферат разослан «26» марта 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.021.01  
кандидат физико-математических наук



А.А. Осипова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Солнечный ветер (СВ) представляет собой плазму с вмороженным магнитным полем, потоки которой заполняют межпланетное пространство и формируют гелиосферу, простирающуюся до границ Солнечной системы. СВ непрерывно истекает из солнечной короны со скоростью 300 – 800 км/с и состоит из двух основных компонент: спокойный (также квазистационарный или рекуррентный) ветер и корональные выбросы массы (КВМ). Спокойный СВ формируется под действием глобального магнитного поля Солнца в корональных дырах (КД) – областях на фотосфере с открытой конфигурацией поля. КВМ являются возмущениями вспышечного характера и представляют собой спорадические выбросы ускоренной плазмы, которая взаимодействует со спокойным СВ, что приводит к её ускорению или замедлению. Несмотря на то, что невозмущенный ветер называется «спокойным», даже в периоды минимума солнечной активности и в отсутствие КВМ скорость СВ может достигать 700 км/с и выше.

СВ является одним из основных факторов, формирующих космическую погоду. Высокоэнергетические частицы повреждают бортовую электронику спутников, а также приводят к возмущениям геомагнитного поля. Скорость СВ и z-компонента межпланетного магнитного поля на орбите Земли практически полностью определяют интенсивность магнитных бурь [1]. Геомагнитные бури в свою очередь могут приводить к выходу из строя различных технических средств, например, изменять сигнал радионавигационных систем и индуцировать токи в линиях электропередач. Одним из наиболее известных примеров энергетической катастрофы, вызванной магнитной бурей, является Квебекское событие, когда была обрушена энергетическая система канадской провинции Квебек [2]. Солнечно-земные связи могут оказывать и более критическое воздействие на нашу жизнь. В мае 1967 г. гигантский солнечный шторм на несколько дней ослепил стратегическую систему раннего обнаружения баллистических ракет США, что едва не привело к началу ядерной войны [3].

В США существует две службы прогнозирования космической погоды: NOAA Space Weather Prediction Center (SWPC, Boulder) для прогноза в гражданских целях и научных исследований и военный центр для специальных задач. Прогнозирование скорости рекуррентных потоков СВ в SWPC основано на модели Wang-Sheeley-Argе (WSA) [4], которая предполагает, что скорость спокойного СВ определяется глобальной структурой магнитного поля в солнечной короне, в первую очередь,

степень расширения магнитных трубок. Для оценки геоэффективности КВМ необходимо добавить в смоделированный спокойный ветер соответствующие возмущения. Поэтому в непрерывном режиме требуется детектировать КВМ и измерять их начальные кинематические параметры. Эта задача в настоящее время решается с помощью космических коронографов: SOHO/LASCO и STEREO. Сейчас продолжаются исследования возможности использования для детектирования КВМ наземных измерений поля доплеровских хромосферных скоростей на полном диске Солнца [5, 6].

В России существует ряд научных коллективов, которые исследуют космическую погоду и СВ, опираясь преимущественно на зарубежные данные, но централизованная служба прогноза, наподобие SWPC, отсутствует. Можно отметить всего несколько примеров практической реализации службы прогнозов СВ или некоторых её фрагментов на основе описанной выше концепции. Отечественные синоптические наблюдения крупномасштабного магнитного поля на полном диске Солнца в настоящее время ведутся только на Кисловодской Горной Астрономической Станции (ГАС ГАО РАН) с помощью телескопа-магнитографа СТОП [7] с 2014 г. Там же на данных СТОП в 2016 г. реализована система оперативного моделирования СВ в приближении WSA и распространения СВ в гелиосфере посредством кинематической модели [8]. Аналог МГД-модели ENLIL создан в ЛЭТИ в рамках студенческого проекта на базе МГД-кода PLUTO. Входные параметры для МГД-расчётов берутся из открытого доступа с сайта NOAA и представляют собой результаты WSA моделирования по данным сети GONG. Третий пример сервиса прогноза СВ создан в Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН (Иркутск) в 2023 г. Сервис также использует данные NOAA, но не параметры СВ вблизи Солнца, а ежедневные магнитограммы сети GONG. Таким образом, развитие методов прогнозирования СВ в России является животрепещущей проблемой, особенно в условиях сильной зависимости от внешних данных.

## **Цели и задачи**

Целью диссертационного исследования является создание основы для системы прогнозирования скорости СВ на базе уже существующих отечественных программ наблюдений. Прогнозирование рекуррентных потоков СВ можно осуществлять на основе измерений магнитографа полного диска Солнца СТОП (ГАС ГАО РАН). Для детектирования КВМ традиционно используются космические коронографы. В России космических солнечных обсерваторий не существует, и их создание займет, очевидно, долгий период. Альтернативный способ регистрации КВМ может быть основан на наблюдениях наземных оптических хромосферных

спектрогелиографов [9], сканирующих полный диск Солнца и работающих в непрерывном режиме.

Для достижения основной цели исследования были поставлены следующие задачи:

- Разработка метода восстановления карт продольной компоненты магнитного поля из спектрополяриметрических данных;
- Создание модели коронального магнитного поля, принимающей в качестве входных данных измерения на фотосфере;
- Исследование связи между параметрами солнечной короны и скоростью СВ;
- Создание модели, позволяющей вычислять скорость СВ на поверхности источника по параметрам коронального магнитного поля;
- Разработка метода быстрой обработки данных патрульного спектрогелиографа в линии Н-альфа;
- Создание каталога эруптивных волокон, которые наблюдались на патрульном телескопе в линии Н-альфа;
- Измерение доплеровских скоростей эруптивных волокон, валидация полученных оценок по данным коронографа;
- Проработка метода оценки геоэффективности КВМ на основе данных патрульного телескопа в линии Н-альфа.

### **Научная новизна работы**

Представлена методика экстраполяции фотосферного магнитного поля в солнечную корону с учётом радиально расширяющегося потока СВ с конечной электрической проводимостью. На основе сопоставления с традиционной моделью PFSS показано, что новая модель может корректно определять источники рекуррентных потоков СВ.

Исследована связь между всевозможными параметрами магнитного поля солнечной короны и наблюдаемой скоростью СВ. Обнаружено, что коэффициент расширения магнитных трубок, традиционно используемый в прогнозировании космической погоды, относительно плохо связан с СВ. Наибольшую корреляцию со скоростью СВ показывает длина силовых линий между фотосферой и поверхностью источника, расстояние от основания силовых линий на фотосфере до границ соответствующих КД и амплитуда магнитного поля на поверхности источника. Предложены соотношения, связывающие эти и другие параметры со скоростью СВ. Представленные соотношения не опираются на коэффициент расширения магнитных трубок и показывает лучшую корреляцию с наблюдениями по сравнению с моделью WSA.

Показано, что доплеровские скорости подъёма эруптивных волокон в линии Н-альфа могут характеризовать скорости соответствующих КВМ.

Кроме того, уровень возмущений в крыльях спектральной линии можно использовать как предвестник эрупции.

### **Практическая значимость работы**

Важным результатом является обоснование эффективности наземных патрульных спектрогелиографов как основы системы регистрации КВМ. Технология детектирования КВМ и определения их начальных параметров является критически важной для прогнозирования космической погоды, и в России её необходимо освоить в кратчайшее время. Создание космического коронографа – это дорогостоящий, сложный и длительный процесс. Решением этой проблемы может быть развитие наземной наблюдательной сети хромосферных спектрогелиографов, поскольку эти приборы относительно дешёвы и просты в изготовлении и, вместе с тем, как показывает данное исследование, эффективны. Разработан оригинальный метод быстрой обработки большого потока данных спектральных профилей в линии Н-альфа и восстановления карт интенсивности, доплеровских скоростей и полуширины линии. Эта процедура может работать в режиме реального времени по мере поступления новых данных.

Представленный новый метод восстановления продольной компоненты магнитного поля ориентирован на интерпретацию синоптических наблюдений крупномасштабного поля и также может работать в составе службы прогнозирования космической погоды. В первую очередь, методика предназначена для данных магнитографа СТОП и показывает лучшее соотношение сигнал/шум и скорость вычислений по сравнению со стандартной для данного телескопа процедурой.

Модель солнечной короны, учитывающая радиально расширяющийся СВ, по простоте вычислений сопоставима с традиционной моделью PFSS, но обладает более тонкой настройкой перехода от потенциального приближения к радиальному. В работе даны первые оценки потенциала этой модели в задачах прогнозирования космической погоды и показано, что по крайней мере в некоторых случаях можно добиться более корректного определения источников СВ по сравнению с моделью PFSS, что непосредственно важно для прогнозирования рекуррентных потоков.

Ещё один путь к совершенствованию прогноза рекуррентного СВ – пересмотр концепции WSA, отказ от использования коэффициента расширения магнитных трубок и выбор других параметров для построения эмпирической модели СВ. Предложенные в работе соотношения для вычисления скорости СВ на поверхности источника основаны на альтернативных характеристиках коронального магнитного поля и показывают лучшую корреляцию с наблюдениями, чем общепринятая в настоящее время модель WSA.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Непотенциальная модель солнечной короны, учитывающая радиально расширяющийся солнечный ветер и её приложение к моделированию рекуррентных потоков СВ.

2. Комплексный анализ корреляции характеристик магнитного поля солнечной короны и скорости СВ показывает, что коэффициент расширения магнитных трубок слабо связан со скоростью СВ. Найдены параметры, более важные для моделирования рекуррентных потоков и предложены альтернативные WSA способы вычисления скорости СВ на поверхности источника.

3. Представлена методика инверсии спектров Н-альфа, предназначенная для обработки данных патрульного хромосферного телескопа в реальном времени. Показано, что спектрографические измерения полного профиля линии Н-альфа на полном диске могут использоваться для оценки начального ускорения КВМ и регистрации предвестников эрупции.

## **Достоверность результатов**

Полученные результаты напрямую и/или косвенно подтверждаются выводами некоторых независимых исследований, а также сравнением с известными рядами данных.

## **Личный вклад автора**

Во всех исследованиях, изложенных в работе, автор принимал активное участие в постановке задач, решении методических вопросов, обсуждениях, интерпретации полученных результатов и написании статей. Автор проделал основную работу по получению, обработке и анализу данных и по разработке программного обеспечения для всех представленных и обсуждаемых в работе моделей и методик.

## **Апробация работы**

Результаты и выводы, приведённые в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: на семинаре кафедры физики Земли СПбГУ, на семинарах ГАО РАН, а также на 12 научных конференциях:

- Ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (ИКИ РАН, Москва, 2021, 2022, 2023);

- Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца, «Солнечная и солнечно-земная физика» (ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2020, 2021, 2022, 2023);
- Ежегодная конференция «Магнетизм и активность Солнца и звезд» (КрАО РАН, Крым, п. Научный, 2021, 2022, 2023);
- XIV школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса» (СПбГУ, Петергоф, 2022);
- Всероссийская конференция «Современные инструменты и методы в астрономии» (САО РАН, Нижний Архыз, 2023).

### Структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем составляет 119 страниц, включая 51 рисунок и 4 таблицы. Список литературы содержит 156 наименований.

### Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы по теме диссертации отражены в 14 публикациях, из которых 10 статей опубликовано в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК и 4 статьи в материалах Всероссийских конференций.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Tlatov A.G., Illarionov E.A., **Berezin I.A.**, Shramko A.D. Prediction of Solar Flares and Background Fluxes of X-Ray Radiation According to Synoptic Ground-Based Observations Using Machine-Learning Models // *Cosmic Research*. 2020. – Vol. 58. – P. 444–449.
2. Tlatov A.G., **Berezin I.A.**, Strelkov M.A. Simulation of Coronal Mass Ejection Propagation Based on Data from Ground-Based Patrol Observations // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020. – Vol. 59. – P. 843–845.
3. **Berezin I.A.**, Tlatov A.G. Comparative Analysis of Terrestrial and Satellite Observations of Photospheric Magnetic Field in an Appendix to Simulation of Parameters of Coronal Holes and Solar Wind // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020. – Vol. 60. – P. 872–875.
4. **Berezin I.A.**, Tlatov A.G., Skorbezh N.N. Restoration of the Profile of Chromospheric Lines in Quiet and Active Areas of the Sun // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2021. – Vol. 61. – P. 1075–1082.
5. **Berezin I.A.**, Tlatov A.G., Pevtsov A.A. Observations of Chromospheric Flows of Matter in Active Regions of the Sun // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2022. – Vol. 62. – P. 862–868.



6. **Berezin I.**, Tlatov A. Coronal Field Geometry and Solar Wind Speed // Universe. 2022. – Vol. 8. – P. 646.

7. Tlatov A.G., **Berezin I.** Modeling the Magnetic Field of the Inner Corona in a Radially Expanding Solar Wind // Physics. 2023. – Vol. 5. – P. 161–167.

8. **Berezin I.A.**, Tlatov A.G., Pevtsov A.A. Solar Filament Eruptions in  $H\alpha$  Doppler Velocity // Astrophysical Journal. 2023. – Vol. 950. – P. 100.

9. Tlatov A.G., **Berezin I.A.** Recovery of a Large-Scale Magnetic Field Using the Stokes I-Profile Approximation Method. Geomagnetism and Aeronomy. 2023. – Vol. 63, № 8. – P. 70–74.

10. **Berezin I.A.**, Tlatov A.G. Modeling the Solar Wind Speed Based on Various Parameters of the Coronal Magnetic Field. Geomagnetism and Aeronomy. 2023. – Vol. 63, № 8. – P. 186–195.

Статьи в сборниках трудов конференций:

11. **Березин И.А.**, Тлатов А.Г. Сравнительный анализ наземных и спутниковых наблюдений фотосферного магнитного поля в приложении к моделированию параметров корональных дыр и солнечного ветра // Труды Всероссийской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика». – Санкт-Петербург, 2019. – С. 39–42.

12. Тлатов А.Г., **Березин И.А.**, Илларионов Е.А. Сравнение площадей измеренных и вычисленных корональных дыр // Труды Всероссийской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика». – Санкт-Петербург, 2021. – С. 269–272.

13. **Березин И.А.**, Тлатов А.Г. Моделирование скорости солнечного ветра на основе различных параметров коронального магнитного поля // Труды Всероссийской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика». – Санкт-Петербург, 2022. – С. 21–24.

14. **Березин И.А.**, Тлатов А.Г., Шрамко А.Д. и др. Система прогнозирования космической погоды по данным наблюдений телескопов ГАС ГАО // Труды Всероссийской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика». – Санкт-Петербург, 2023. – С. 27–30.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования диссертационной работы, сформулированы основные цели и задачи исследования, изложено содержание работы.

**Первая глава** диссертации посвящена проблеме наблюдения магнитных полей на Солнце. В первых пяти параграфах описываются известные физические принципы, на основе которых ведутся измерения

различных компонент магнитного поля. Некоторое внимание также уделено обзору способов практической реализации наблюдений, в первую очередь, на примере магнитографа СТОП. В **параграфе 1.6** кратко изложены наиболее популярные подходы к решению задачи инверсии профилей Стокса. Основной результат первой части диссертационного исследования содержится в **параграфе 1.7**, где представлен новый метод восстановления продольной компоненты магнитного поля, основанный на аппроксимации полных профилей магниточувствительных линий. Предлагается определять величину зеемановского расщепления путём аппроксимации профилей спектральных линий в разных поляризациях функцией Гаусса с помощью быстрых приближенных методов Guo [10] и FAS [11]. Метод ориентирован в первую очередь на синоптические наблюдения крупномасштабного поля, при которых нужно обрабатывать большой поток зашумлённых данных. Тестирование методики на данных СТОП показывает, что она работает быстрее и стабильнее, чем стандартная для данного телескопа процедура.

Во **второй главе** рассматриваются задачи экстраполяции фотосферного магнитного поля в солнечную корону и моделирования рекуррентных потоков СВ. Расчёты в этой части исследования опираются на синоптические карты фотосферного поля, способ создания которых описан в **параграфе 2.1**. **Параграф 2.2** представляет собой краткий обзор подходов к моделированию солнечной короны. В **параграфе 2.3** представлено решение для определения полного вектора магнитного поля  $\vec{B}$  с учётом радиально расширяющегося потока СВ конечной электрической проводимости, однородного по сферическим координатам  $\theta$  и  $\varphi$ . Решение основывается на результате Bogdan и Low [12], которые предложили метод представления магнитного поля для статической радиально стратифицированной атмосферы Солнца через скалярные функции  $\Phi$  и  $\Psi$ :

$$\vec{B} = \Psi \left( r, \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \vec{e}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} \vec{e}_\varphi, \quad (1)$$

где  $\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi$  – единичные векторы. Так же, как и Bogdan и Low, предположим, что ток  $\vec{J}$ , направлен перпендикулярно гравитации. В данном случае считается, что квазипостоянный СВ распространяется радиально ( $\vec{v} = v_r = v$ ), а ток  $\vec{J}$  формируется при взаимодействии радиально расширяющегося ветра и магнитного поля. Следуя уравнению (1), уравнениям Максвелла для ротора и дивергенции  $\vec{B}$ , обобщённому закону Ома и свойствам ортогональности полиномов Лежандра, решение для  $\vec{B}$  можно найти в виде:

$$B_r = \sum_n \sum_m \frac{A_{nm}}{r^2} \exp \left( \int_{r'=R_\odot}^r -\frac{n(n+1)}{r' R_m} dr' \right) Y_n^m, \quad (2)$$

$$B_\theta = \sum_n \sum_m^n \frac{-A_{nm}}{r^2 R_m} \exp\left(\int_{r'=R_\odot}^r -\frac{n(n+1)}{r' R_m} dr'\right) \frac{\partial Y_n^m}{\partial \theta}, \quad (3)$$

$$B_\varphi = \sum_n \sum_m^n \frac{-A_{nm}}{r^2 \sin \theta R_m} \exp\left(\int_{r'=R_\odot}^r -\frac{n(n+1)}{r' R_m} dr'\right) \frac{\partial Y_n^m}{\partial \varphi}, \quad (4)$$

где  $R_\odot$  – радиус Солнца,  $R_m = r\sigma\mu\nu$  – магнитное число Рейнольдса,  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость,  $\mu$  – магнитная проницаемость. Функция  $Y_n^m(\theta, \varphi)$  выражается через присоединенные полиномы Лежандра  $P_n^m(\cos \theta)$ :

$$Y_n^m = (-1)^m \left[ \frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!} \right]^{1/2} P_n^m(\cos \theta) \exp(im\varphi). \quad (5)$$

$A_{nm}$  можно определить из магнитного поля на фотосфере  $F(\theta, \varphi)$ :

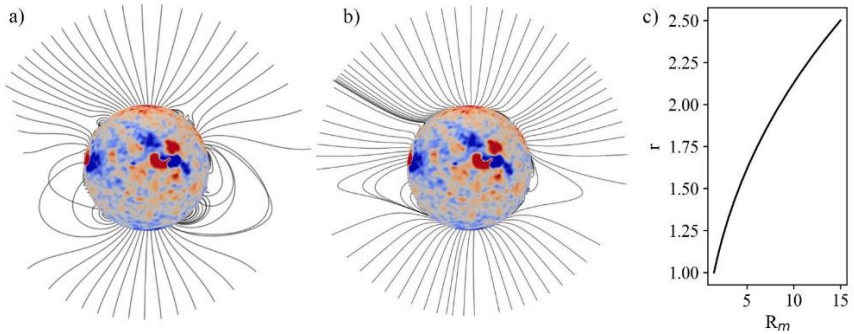
$$A_{nm} = \int F(\theta, \varphi) Y_n^m(\theta, \varphi) d\Omega, \quad (6)$$

где  $\Omega$  – телесный угол.

Далее приведен пример расчетов конфигурации магнитного поля в короне на момент солнечного затмения 21.08.2017. В качестве краевых условий использовалась синоптическая карта, составленная по данным наблюдений СТОП для оборота Кэррингтона 2194. Чтобы провести расчёт по схеме (2 – 4) необходимо задать функцию  $R_m = r\sigma\mu\nu$ . Для этого была выбрана степенная зависимость  $R_m(r) = R_m^0 r^\alpha$ . При интегрировании получим:

$$\int_{r'=R_\odot}^r \frac{1}{r' R_m} dr' = \int_{r'=R_\odot}^r \frac{1}{R_m^0 (r')^{\alpha+1}} dr' = -\frac{1}{R_m^0 \alpha r^\alpha}. \quad (7)$$

При значениях магнитного числа Рейнольдса  $R_m$  больше 10 расчет дает только прямые радиальные лучи, а для  $R_m$  меньше 0.5 имеет место случай потенциального магнитного поля. На Рис. 1b представлены результаты моделирования формы короны на момент солнечного затмения 21.08.2017 согласно формулам (2 – 4). Для сравнения на Рис. 1a также приведены PFSS расчеты. Параметры радиальной функции (Рис. 1c) выбраны так, чтобы конфигурация силовых линий совпадала с наблюдениями наилучшим образом ( $R_m^0 = 1.5, \alpha = 2.5$ ). Области замкнутых силовых линий магнитного поля соответствуют областям существования шлемовидных лучей наблюдаемой солнечной короны. В полярных областях наблюдаются регионы с открытыми конфигурациями магнитных полей, соответствующие полярным корональным щёткам. Несмотря на отсутствие условия поверхности источника, в расчетах, согласно представленной модели, открытые силовые линии магнитного поля также вытягиваются в направлении близком к радиальному.

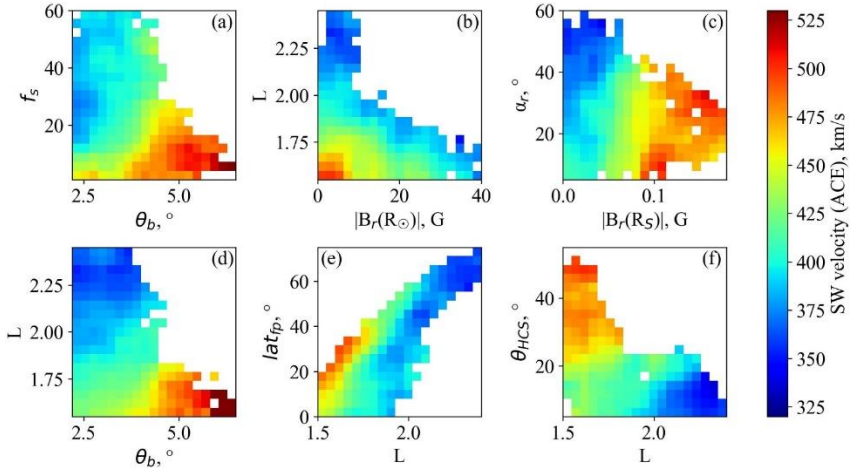


**Рис. 1.** Конфигурация силовых линий магнитного поля на лимбе для 21.08.2017 (2194 оборот Кэррингтона). а) Потенциальное приближение (PFSS); б) модель с учётом радиально расширяющегося солнечного ветра; в) соответствующая зависимость магнитного числа Рэйнольдса от радиальной координаты.

В **параграфе 2.4** описывается модель WSA, позволяющая вычислять скорость рекуррентного СВ на поверхности источника, также перечислены некоторые недостатки модели. Обзор методов расчёта распространения СВ в гелиосфере, включая используемое в работе кинематическое приближение, можно найти в **параграфе 2.5**. В **параграфе 2.6** приведены результаты исследования связи между наблюдаемой скоростью СВ и различными параметрами коронального магнитного поля. Все расчёты основаны на синоптических картах продольной компоненты крупномасштабного магнитного поля:

- СТОП (Кисловодск): карты с разрешением  $720 \times 360$  и равномерным шагом по широте, 2152 – 2266 обороты Кэррингтона (2014 – 2023 гг.);
- SDO/HMI: карты с разрешением  $720 \times 360$  и синус-проекцией по широте, 2097 – 2266 обороты Кэррингтона (2010 – 2023 гг.);
- WSO: карты с разрешением  $72 \times 30$  и синус-проекцией по широте, 1642 – 2258 обороты Кэррингтона (1974 – 2022 гг.), с заполненными пропусками в данных.

Экстраполяция фотосферного поля в солнечную корону производилась в PFSS приближении с радиусом поверхности источника  $2.5R_{\odot}$ . По каждой карте были построены открытые силовые линии, пересекающие поверхность источника в плоскости эклиптики с шагом  $2.5^{\circ}$  долготы. В рамках настоящей работы были рассмотрены параметры модели WSA (коэффициент расширения трубок  $f_s$  и расстояние от основания силовой линии до границы корональной дыры  $\theta_b$ ), а также следующие характеристики силовых линий:



**Рис. 2.** Связи между разными парами параметров магнитного поля и скоростью солнечного ветра. Сопоставление данных ACE с расчётами по данным СТОП в плоскости эклиптики со скважностью  $\sim 4.5$  часа за период 2014-2022 гг. Изображения сглажены окном с радиусом 1 пиксель.

- $L$  – длина открытых силовых линий между фотосферой и поверхностью источника в единицах солнечного радиуса;
- $\theta_{bs}$  – кратчайшее угловое расстояние на поверхности источника до границы проекции корональной дыры на поверхность источника, в градусах;
- $\alpha_r$  – средний угол отклонения силовых линий от радиального направления на разных диапазонах высот, в градусах;
- Амплитуда радиальных компонент магнитного поля на поверхности источника и в основании соответствующей трубки на фотосфере –  $|B_r(R_s)|$  и  $|B_r(R_\odot)|$ ;
- $\theta_{HCS}$  – кратчайшее угловое расстояние по поверхности источника до гелиосферного токового слоя, в градусах;
- $lat_{fp}$  – широта основания силовых линий на фотосфере в градусах, ноль соответствует экватору.

В результате описанной выше процедуры для каждого оборота были получены 144 значения каждого из параметров магнитного поля на широте  $V_0$  с шагом  $2.5^\circ$  долготы по поверхности источника, которые сопоставлялись с наблюдаемым на спутнике ACE СВ с учётом времени распространения до точки наблюдения. Сопоставление различных комбинаций параметров поля с наблюдаемой на спутнике скоростью СВ представлено на Рис. 2. В первую очередь можно увидеть, как выполняется зависимость, лежащая в основе модели WSA (Рис. 2а). Центральные

области корональных дыр соответствуют малому расширению магнитных трубок и являются источниками быстрого СВ. Медленные потоки наблюдаются ближе к краям корональных дыр и соответствуют, в основном, большим значениям  $f_s$ . Кроме того, видны некоторые закономерности в соответствии с физическим смыслом рассматриваемых параметров магнитного поля:

- Более длинные силовые линии приносят в плоскость эклиптики более медленный ветер (Рис. 2b,d,e,f);
- Большая амплитуда магнитного поля на поверхности источника  $|B_r(R_s)|$  связана с большей скоростью СВ (Рис 2c), для фотосферного поля  $|B_r(R_\odot)|$  зависимость обратная (Рис. 2b);
- Источниками быстрого СВ в плоскости эклиптики являются среднеширотные корональные дыры (Рис. 2e);
- При увеличении расстояния до токового слоя  $\theta_{HCS}$  скорость СВ на поверхности источника растёт (Рис. 2f);
- Быстрый СВ наблюдается при силовых линиях, которые не очень сильно отклоняются от радиального направления, в пределах  $40^\circ$  (Рис. 2c).

В качестве численной оценки взаимосвязей параметров магнитного поля с наблюдаемой скоростью СВ использовался коэффициент корреляции Пирсона. Предварительно все величины усреднялись по оборотам Кэррингтона с шагом в один оборот.

**Таблица 1.** Коэффициенты корреляции Пирсона между параметрами магнитного поля и наблюдаемой скоростью ветра по усреднённым за оборот Кэррингтона значениям. Расчёты по данным STOP (2014 – 2023 гг., 2152 – 2266 обороты), HMI (2010 – 2023 гг., 2097 – 2266 обороты) и WSO (1974 – 2022 гг., 1642 – 2258 обороты).

	$1/f_s$	$\theta_b$	$\theta_{bss}$	$1/L$	$ B_r(R_\odot) $	$ B_r(R_s) $	$\theta_{HCS}$
STOP	0.221	0.535	0.485	0.579	0.280	0.427	0.404
HMI	0.215	0.449	0.364	0.331	0.043	0.340	0.215
WSO	0.153	0.318	0.264	0.228	0.040	0.298	0.030

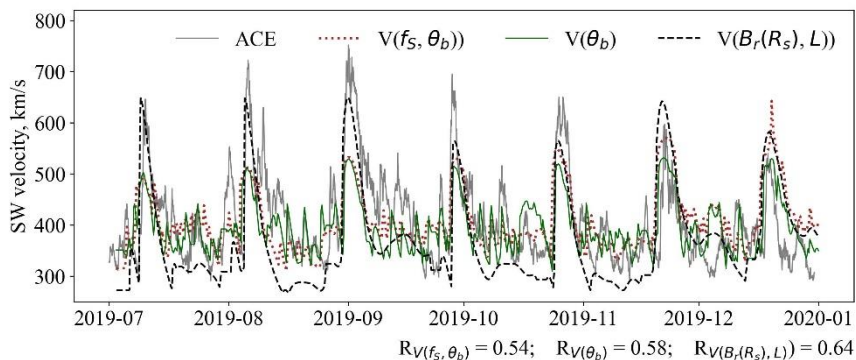
Коэффициенты корреляции наиболее перспективных параметров поля со скоростью СВ представлены в Таблице 1. Для разных приборов в разные интервалы времени предпочтительными оказываются разные параметры. В случае данных СТОП наиболее сильную корреляцию со скоростью СВ показывает длина силовых линий  $L$ . В остальных случаях –  $\theta_b$ , второй параметр WSA, причём коэффициент расширения магнитных трубок  $f_s$  оказывается является едва ли не худшим параметром среди рассмотренных. В то же время неплохой корреляцией со скоростью СВ обладает амплитуда магнитного поля на поверхности источника  $|B_r(R_s)|$ . С учётом относительно низкой корреляции  $f_s$  со скоростью СВ возникает вопрос: насколько успешно можно моделировать скорость СВ не учитывая расширение

магнитных трубок. Для ответа на этот вопрос было предложено несколько вариантов соотношений (8, 9, 10), связывающих характеристики силовых линий магнитного поля со скоростью СВ. Оптимальные коэффициенты в соотношениях подбирались по данным СТОП с шагом ~4.5 часа для второй половины 2019 г., когда СВ носил выражено рекуррентный характер.

$$V(f_s, \theta_b) = 265 + \frac{1.33}{(1 + f_s)^{0.224}} (8 - 2.75 \exp(-(\theta_b/2.6)^{1.52}))^{2.78}. \quad (8)$$

$$V(\theta_b) = 265 + 80(5.2 - 5.7 \exp(-(\theta_b/3.9)^{1.76}))^{0.73}. \quad (9)$$

$$V(B_r(R_s), L) = 265 + \frac{|B_r(R_s), nT|^{0.724}}{L^{1.186}}. \quad (10)$$

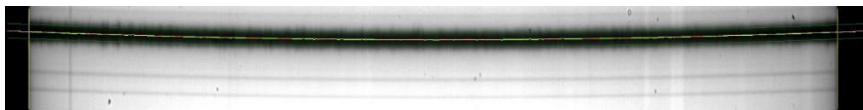


**Рис. 3.** Наблюдаемая в точке  $L_1$  скорость солнечного ветра (ACE). Сравнение с разными моделями:  $V(f_s, \theta_b)$  (WSA, формула (8));  $V(\theta_b)$  (формула (9));  $V(B_r(R_s), L)$  (формула (10)).

Исключение коэффициента расширения магнитных трубок из соотношения WSA практически не влияет на результаты моделирования и несколько улучшает коэффициент корреляции с наблюдаемой скоростью СВ: 0.58 без  $f_s$  против 0.54 при использовании стандартного соотношения WSA (Рис. 3). Строя модель на длине силовых линий  $L$  и амплитуде поля  $|B_r(R_s)|$ , можно точнее описать высокоскоростные потоки (Рис. 3) и добиться большего коэффициента корреляции с наблюдениями (0.64).

Вторая глава работы завершается **параграфом 2.6.4**, в котором приведён пример WSA расчётов на основе непотенциальной модели короны, представленной в **параграфе 2.3**. Эти расчёты показывают, что новая модель короны по крайней мере в некоторых случаях позволяет несколько точнее определить источники СВ. Это подтверждается также сравнением смоделированных КД с данными, полученными из наблюдений в ультрафиолете. Но этот вопрос требует более глубокого изучения в дальнейшем.

**Третья глава** диссертации начинается с обзора инструментов диагностики хромосферы в линии  $H_{\alpha}$ , в первую очередь, эруптивных процессов. В целом, глава посвящена обоснованию использования наземных патрульных спектрогелиографов в линии  $H_{\alpha}$  для регистрации КВМ и определения их начальных кинематических параметров. В **параграфе 3.1** дано описание патрульных спектрогелиографов в линии  $H_{\alpha}$  и Ca II K, созданных и функционирующих на ГАС. Приборы имеют спектральное разрешение  $\approx 40000$  и пространственное разрешение  $\approx 1.5''$ . Пример спектров, полученных в линии  $H_{\alpha}$ , представлен на Рис. 4.



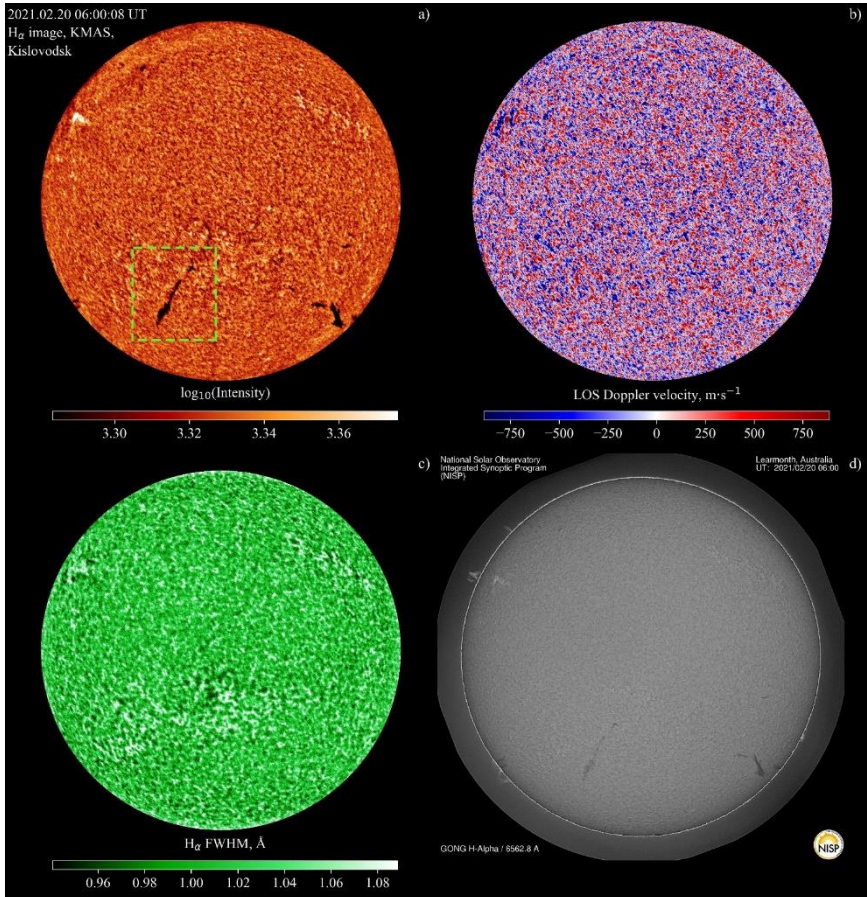
**Рис. 4.** Спектры  $H_{\alpha}$ , соответствующие одному положению изображения Солнца на щели спектрографа. Линиями показаны положения лимба Солнца и ядер  $H_{\alpha}$  (аппроксимированных полиномом второй степени), а также диапазон длин волн, используемый для аппроксимации функций Гаусса. Размер кадра составляет  $2000 \times 250$  пикселей, длина волны уменьшается сверху вниз.

Оригинальная методика обработки спектральных данных в линии  $H_{\alpha}$  на полном диске Солнца изложена в **параграфе 3.2**. Метод основан на аппроксимации полных профилей линии  $H_{\alpha}$  функцией Гаусса с помощью быстрых приближенных методов Guo [10] и FAS [11]. Это позволяет обрабатывать весь поток данных с патрульного телескопа ( $\approx$  миллион спектральных профилей в минуту) в режиме реального времени и создавать карты интенсивности, доплеровских скоростей и ширины спектральной линии на полном диске Солнца (Рис. 5). Методика предназначена для первичной обработки данных.

В **параграфе 3.3** показано, как с помощью простой двухкомпонентной модели можно восстанавливать поле доплеровских скоростей в солнечных волокнах. Методика не является оригинальной и основана на вычитании из наблюдаемого спектра в волокне профиля, характерного для спокойной хромосферы. Показано, что на патрульном телескопе в линии H-альфа можно наблюдать процесс выброса волокна, включая фазу активизации и медленного подъёма.

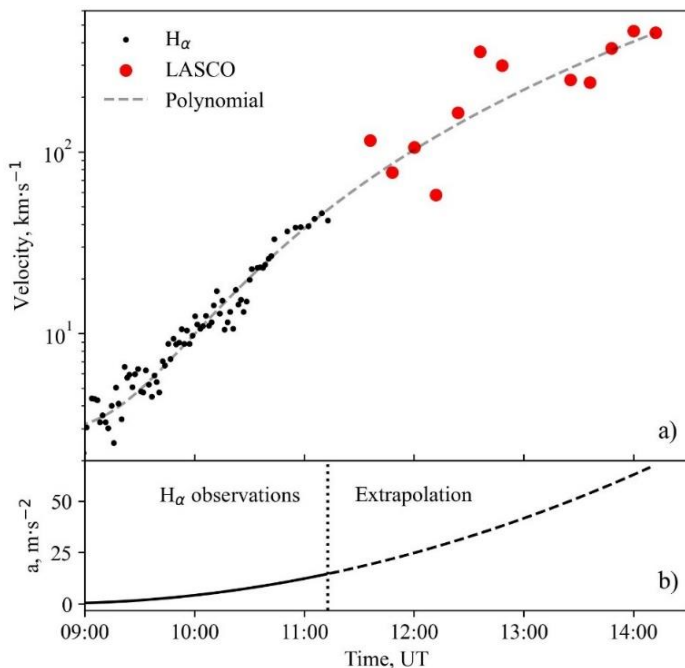
Сопоставление доплеровских скоростей эруптивных волокон с данным коронографа LASCO, представленное в **параграфе 3.4**, даёт хорошее соответствие между измерениями на уровне хромосферы и измерениями в верхней короне (Рис. 6). Это показывает, что автоматические наблюдения на хромосферном спектрогелиографе полного диска Солнца могут использоваться для оценки начального ускорения КВМ.





**Рис. 5.** Пример восстановленных карт интенсивности в ядре  $H_{\alpha}$  (a), доплеровской скорости (b) и полуширины линии  $H_{\alpha}$  (c) по наблюдениям 2021.02.20 06:00 UT. На панелях (a) и (c) устранён эффект вариации интенсивности от центра к лимбу. Зелёная пунктирная рамка на панели (a) указывает положение эруптивного волокна. Изображение в ядре  $H_{\alpha}$  по данным сети GONG (d).

В параграфе 3.5 показано, что в качестве предвестника эрупции можно использовать стандартное отклонения параметра BR – разности суммарной интенсивности в крыльях спектральной линии. По сравнению с доплеровскими скоростями этот параметр вычисляется быстро и надёжно. За несколько часов до эрупции можно наблюдать рост возмущений в движении волокна, что можно использовать как сигнал о предстоящем выбросе (Рис. 7).

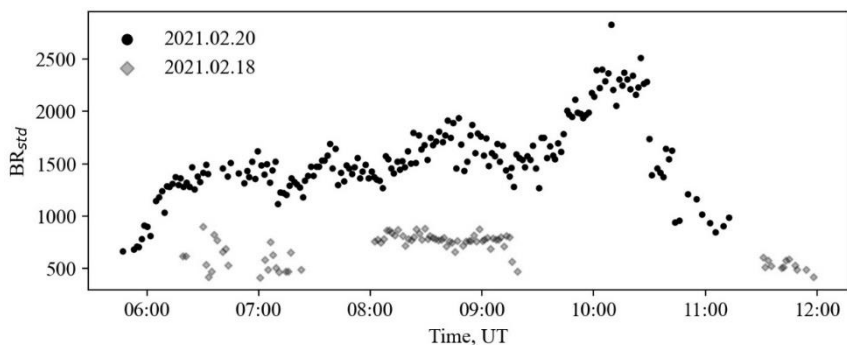


**Рис. 6.** (а) Средняя лучевая скорость эруптивного волокна 2021.02.20 по наблюдениям в линии  $\text{H}\alpha$  и её экстраполяция полиномом третьей степени. Скорость КВМ по наблюдениям коронографа LASCO C2. (б) Среднее ускорение на основе полиномиальной аппроксимации и её экстраполяции.

Ещё один результат, описанный в **параграфе 3.6**, заключается в том, что получена положительная связь между скоростью затухания тангенциальной компоненты магнитного поля над волокном и ускорением волокна. Это не новый результат, но ценный, поскольку такого рода наблюдательных данных ограниченное количество, а соответствующие исследования затрагивают немногочисленные наборы событий.

В завершении диссертационного исследования в **параграфе 3.7** показано, как можно моделировать перенос КВМ, зарегистрированного на патрульном телескопе, в рекуррентных потоках солнечного ветра в простом аэродинамическом приближении для оценки геоэффективности выброса.

В **заключении** подводятся итоги и формулируются основные выводы диссертационной работы.



**Рис. 7.** Стандартное отклонение параметра BR в теле волокна в день эрупции 2021.02.20 (чёрные точки) и за два дня до эрупции 2021.02.18 (серые точки).

## Цитируемая литература

1. Snyder C.W., Neugebauer M., Rao U.R. The Solar Wind Velocity and Its Correlation with Cosmic-Ray Variations and with Solar and Geomagnetic Activity // *Journal of Geophysical Research*. 1963. – Vol. 68. – P. 6361.
2. Boteler D.H. A 21st Century View of the March 1989 Magnetic Storm // *Space Weather*. 2019. – Vol. 17. – P. 1427–1441.
3. Knipp D.J. et al. The May 1967 Great Storm and Radio Disruption Event: Extreme Space Weather and Extraordinary Responses // *Space Weather*. 2016. – Vol. 14. – P. 614–633.
4. Arge C.N. et al. Stream Structure and Coronal Sources of the Solar Wind during the May 12th, 1997 CME // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2004. – Vol. 66. – P. 1295–1309.
5. Seki D. et al. Small-Scale Turbulent Motion of the Plasma in a Solar Filament as the Precursor of Eruption // *ApJ*. 2021. – Vol. 918, № 1. – P. 38.
6. Wang S. et al. Velocities of an Erupting Filament. // *ApJ*. 2022. – Vol. 926. – P. 18.
7. Пещеров В.С. и др. Солнечный телескоп оперативных прогнозов нового поколения // *Автометрия*. 2013. – Т. 49, № 6. С. 62-69.
8. Tlatov A.G. et al. Forecast of Solar Wind Parameters According to STOP Magnetograph Observations // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016. – Vol. 56. – P. 1095–1103.
9. Tlatov A.G. et al. Space Weather Parameters: Modeling and Prediction from the Data of Groundbased Observations of Solar Activity // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2017. – Vol. 57. – P. 854–858.
10. Guo, H. A Simple Algorithm for Fitting a Gaussian Function [DSP Tips and Tricks] // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2011. – Vol. 28, № 5. – P. 134–137.
11. Al-Nahhal I. et al. A Fast, Accurate, and Separable Method for Fitting a Gaussian Function [Tips & Tricks] // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2019. – Vol. 36, № 6. – P. 157–163.
12. Bogdan T.J., Low B.C. The Three-Dimensional Structure of Magnetostatic Atmospheres. II. Modeling the Large-Scale Corona // *ApJ*. 1986. – Vol. 306. – P. 271.