

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор федерального государственного  
бюджетного учреждения «Институт  
прикладной геофизики имени академика  
Е.К. Федорова»

д.ф.-м.н. доцент

«11» марта 2024 г.

А.Ю. Репин

## ОТЗЫВ

**Ведущей организации** - Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова» **на диссертацию Березина Ивана Александровича** «Прогноз скорости солнечного ветра по данным наземных наблюдений Солнца» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. – «Физика космоса, астрономия»

Диссертационная работа И.А. Березина содержит решение актуальной научной задачи прогнозирования скорости солнечного ветра по данным наземных наблюдений Солнца и является завершенной квалификационной работой – диссертацией на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Актуальность выбранной темы диссертации безусловна и подтверждает лидерство ГАС ГАО РАН в проведении исследований по мониторингу скорости солнечного ветра по данным наземных наблюдений Солнца на основе многолетних непрерывных наблюдений Солнца, созданием и эксплуатацией технических средств, среди которых – СТОП – солнечный телескоп оперативных прогнозов.

В создании СТОПа и его эксплуатации принимал участие ФГБУ «ИПГ», что указано в материалах диссертации. Многолетнее сотрудничество специалистов ФГБУ «ИПГ» с ГАС ГАО РАН позволяет отслеживать, оценивать и использовать полученные результаты в совершенствовании национального гелиогеофизического мониторинга, в наземных наблюдениях солнечной активности.

Следует отметить, что соискатель выполнил работу на основе «полевых» наблюдений в условиях высокогорья на высоте 2100 м над уровнем моря в сложных климатических условиях.

В диссертации дано развёрнутое и квалифицированное описание современных методов прогноза скорости солнечного ветра (СВ), основанное на представлениях о структуре крупномасштабного магнитного поля Солнца и параметрах корональных выбросов массы (КВМ). Изложен собственный вклад автора в данную проблему, предложены новые модели и подходы. Диссертационное исследование направлено на разработку методов практического применения отечественных синоптических наблюдений Солнца для комплексного прогнозирования скорости СВ, что необходимо для прогнозов гелиогеофизической обстановки. Прогнозирование параметров солнечного ветра в России до разработанных И.А.Березиным технологий решалось преимущественно по зарубежным данным. В диссертации основное внимание уделено использованию телескопа-магнитографа СТОП и солнечного патрульного оптического телескопа-спектрогелиографа в линии  $H\alpha$ .

Для достижения основной цели диссертации решались следующие задачи:

- 1) Разработка метода восстановления карт продольной компоненты магнитного поля из спектрополяриметрических данных;
- 2) Создание модели коронального магнитного поля, принимающей в качестве входных данных измерения на фотосфере;
- 3) Исследование связи между параметрами солнечной короны и скоростью СВ. Создание модели, позволяющей вычислять скорость СВ на поверхности источника по параметрам коронального магнитного поля;
- 4) Разработка метода быстрой потоковой обработки данных патрульного спектрогелиографа в линии  $H\alpha$ . Создание каталога эруптивных волокон, которые наблюдались на этом телескопе, измерение их доплеровских скоростей, валидация полученных оценок по данным коронографа.
- 5) Проработка метода оценки геоэффективности КВМ на основе данных наблюдений Солнца в линии  $H\alpha$ .

Решение указанных задач структурно организовано во введении, трех разделах, заключении. Полный объем диссертации составляет 119 страниц с 51 рисунком и 4 таблицами. В списке литературы 156 источников.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования диссертационной

работы, сформулированы основные цели и задачи исследования, изложено содержание работы.

В **первом разделе** проведен анализ наземных наблюдений крупномасштабного магнитного поля Солнца и методов интерпретации спектральных данных, а также представлен оригинальный метод обработки спектрополяриметрических наблюдений.

Во **втором разделе** рассмотрена проблема моделирования скорости СВ на основе карт крупномасштабного магнитного поля Солнца, изложено два новых результата. Во-первых, представлена новая модель солнечной короны, которая учитывает присутствие СВ во всей короне, в отличие от классических потенциальных моделей (PFSS и подобных). Во-вторых, предложены альтернативные модели Wang-Sheeley-Argе подходы к вычислению скорости СВ.

В **третьем разделе** обосновано использование наземных патрульных наблюдений на хромосферных телескопах-спекрогелиографах для мониторинга КВМ, определения их начального ускорения и моделирования их распространения в гелиосфере. Представлена методика построения карт доплеровских скоростей в хромосфере, проведён анализ нескольких эруптивных событий. Показано соответствие между начальным ускорением эруптивных волокон и скоростью КВМ в верхней короне. Предложен метод прогнозирования эрупции за несколько часов до начала активной фазы;

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

Диссертация выполнена на высоком научном уровне, есть анализ и синтез требований к решению задачи, моделирование, полученные результаты являются новыми, практически важными и актуальными. Основные выводы работы напрямую и/или косвенно подтверждаются результатами независимых исследований. Очевидна и перспектива развития дальнейших исследований.

Вынесенные на защиту положения диссертации докладывались И.А. Березиным на научных конференциях и были опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. С 2019 по 2024 по теме диссертации

соискателем было опубликовано 14 статей, из них 10 в рецензируемых изданиях, в том числе, одна статья в журнале первой четверти. Результаты исследования ориентированы на гелиогеофизическое обеспечение и прогнозирование космической погоды.

Достоверность результатов, подтверждается указанным соискателем соответствием напрямую и/или косвенно выводам известных независимых исследований, а также сравнением с известными рядами данных, аргументированными и логически непротиворечивыми рассуждениями, грамотным использованием фундаментальных физических законов.

Личный вклад соискателя в выполненной работе сомнений не вызывает.

**Научной новизной характеризуются следующие результаты:**

- методика экстраполяции фотосферного магнитного поля в солнечную корону с учётом радиально расширяющегося потока СВ с конечной электрической проводимостью (эта модель может более корректно определять источники рекуррентных потоков СВ по сравнению с традиционной PFSS-моделью);

- 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. Поэтому 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;

- доплеровские скорости подъёма эруптивных волокон в линии H-альфа могут характеризовать скорости соответствующих KBM. Кроме того, уровень возмущений в крыльях спектральной линии можно использовать как предвестник эрупции.

В **практической значимости** работы отмечена необходимость совершенствования инструментальной базы, оригинальный метод быстрой обработки большого потока данных спектральных профилей в линии H-альфа и

восстановления карт интенсивности, доплеровских скоростей и полуширины линии. Эта процедура может работать в режиме реального времени при поступлении новых данных.

Представленный новый метод восстановления продольной компоненты магнитного поля ориентирован на интерпретацию синоптических наблюдений крупномасштабного поля и также может использоваться в гелиогеофизическом мониторинге. 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 классической моделью PFSS, но обладает более тонкой настройкой перехода от потенциального приближения к радиальному. Это позволяет добиться более корректного определения источников СВ, что непосредственно важно для прогнозирования рекуррентных потоков.

Работа не лишена некоторых недостатков.

1. В диссертации приведена значительная длина отрезка экстраполяции по сравнению с базой для экстраполяции на логарифмической шкале.

2. Для развития исследований и перспектив внедрения полученных результатов в регламент работы информационно-аналитических центров, необходимо учитывать РД 52.27.284-91 (Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов).

3. Нет расшифровки аббревиатуры СТОП в автореферате.

В целом соискатель в выполненной диссертационной работе успешно решил новую актуальную научную задачу, получил ее практические реализации при мониторинге солнечной активности, показал высокий уровень подготовки, как специалиста высшей квалификации, в том числе при обсуждении содержания диссертации на семинаре ФГБУ «ИПГ» 21.02.2024 г.

Диссертация написана хорошим русским языком и понятна. Автореферат диссертации соответствует содержанию работы.

Указанные замечания и незначительные погрешности не влияют на общее

положительное заключение о целостности и высоком научном уровне квалификационной работы.

Учитывая тенденции развития зарубежных аналогов, использование технических решений СТОПов в совершенствовании системы Global Oscillation Network Group (GONG) NSF, содержание проектов Центра прогнозирования космической погоды NOAA возникает необходимость публикации в отдельной монографии материалов диссертации И.А.Березина.

Таким образом, диссертация Березина Ивана Александровича «Прогноз скорости солнечного ветра по данным наземных наблюдений Солнца» представляет собой цельную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научной задачи физики Солнца.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2023 г., а ее соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. – «Физика космоса, астрономия».

Отзыв подготовил главный научный сотрудник ФГБУ «ИПГ», доктор технических наук, старший научный сотрудник.

А.В. Тертышников

Отзыв обсужден и одобрен на заседании ученого совета ФГБУ «ИПГ» 21.02.2024 г.

Ученый секретарь ФГБУ «ИПГ», кандидат физ.-мат. наук

Е.Н. Хотенко

тел.: +7(499)181-45-54, e-mail: [khotenko@ipg.geospace.ru](mailto:khotenko@ipg.geospace.ru)

Подписи Тертышникова А.В. и Хотенко Е.Н. заверяю: Начальник отдела кадров ФГБУ «ИПГ»

Г.А. Ямщикова

#### Сведения о ведущей организации:

ФГБУ «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова»  
129128, Москва, ул. Ростокинская, д. 9.  
тел.: +7(499)187-81-86, e-mail: [director@ipg.geospace.ru](mailto:director@ipg.geospace.ru)

