

ОТЗЫВ

**на автореферат диссертации Илларионова Егора Александровича
«Параметрическое описание процессов и явлений солнечной активности»,
представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических
наук по специальности 1.3.1 - «Физика космоса, астрономия»**

Актуальность работы

Диссертация Е. А. Илларионова посвящена разработке новых аналитических и численных методов перехода от качественного описания процессов и явлений солнечной активности к их количественному параметрическому представлению. Данная задача имеет фундаментальное значение для современной физики Солнца, поскольку количественное описание физических процессов и наблюдаемых структур является необходимым условием проверки теоретических моделей, сопоставления результатов различных наблюдений, построения однородных рядов данных и разработки методов прогнозирования солнечной активности.

Актуальность выбранного направления особенно возрастает в связи с быстрым увеличением объёма данных современных наземных и космических обсерваторий. Поток наблюдений уже существенно превосходит возможности их ручной обработки. Вместе с тем традиционные автоматические алгоритмы, основанные на жёстко заданных правилах, не всегда способны воспроизводить результаты экспертного анализа и учитывать разнообразие наблюдаемых солнечных структур. В этих условиях методы машинного обучения предоставляют новые возможности для построения репрезентативных параметризаций, выявления закономерностей в многомерных данных и автоматического переноса методов экспертной обработки на большие наблюдательные серии.

В автореферате обоснованно выделены несколько взаимосвязанных проблем современной физики Солнца: количественная оценка роста магнитных полей в случайных средах; калибровка динамо-моделей на основе наблюдений; создание методов машинной обработки данных, воспроизводящих работу астрономов-экспертов; выявление взаимосвязей в пространствах высокой размерности; формирование многолетних рядов солнечной активности на основе современных и исторических наблюдений.

Актуальность теоретической части работы определяется необходимостью более глубокого понимания начальной стадии магнитогидродинамического динамо. Известные аналитические подходы часто основаны на предположениях о коротком времени корреляции, изотропии и упрощённой статистике случайного поля скоростей. В диссертации рассматриваются более общие модели случайной среды с конечным временем памяти и анизотропией. Получение аналитических оценок скоростей роста магнитного поля и его статистических моментов в таких моделях важно как для развития теории динамо, так и для независимой проверки результатов численного моделирования.

Другой актуальной задачей является ассимиляция наблюдательных данных в моделях солнечного динамо. Физическая ценность и прогностические возможности таких моделей в значительной степени определяются тем, насколько хорошо их параметры

ограничиваются наблюдениями. Использование нейро-дифференциальных уравнений позволяет совместить физическую динамическую модель с современными методами оптимизации и машинного обучения и тем самым предложить новый подход к восстановлению неизвестных параметров и функциональных зависимостей непосредственно из наблюдаемых данных.

Наблюдательная часть работы посвящена автоматическому анализу корональных дыр, параметризации геометрической структуры групп солнечных пятен и восстановлению параметров активности по историческим каталогам. Эти направления имеют значение как для фундаментального исследования солнечного магнетизма и цикличности, так и для оперативного мониторинга солнечной активности и прогноза космической погоды.

Таким образом, тема диссертации отвечает современным задачам физики Солнца, теории магнитогидродинамического динамо, анализа больших астрономических данных и исследования солнечно-земных связей.

Цели и содержание диссертационной работы

Целью диссертации является развитие новых аналитических и численных методов параметрического описания процессов и явлений солнечной активности, а также исследование физических свойств получаемых параметров.

В соответствии с авторефератом в работе решаются следующие основные задачи:

1. получение оценок скоростей роста магнитного поля и его старших статистических моментов на начальной стадии динамо в изотропных и анизотропных случайных средах;
2. оценка параметров моделей солнечного динамо по наблюдательным данным с использованием нейро-дифференциальных уравнений;
3. разработка автоматического метода сегментации корональных дыр на изображениях солнечного диска и синоптических картах, воспроизводящего результаты экспертной обработки;
4. построение компактного параметрического описания геометрической структуры групп солнечных пятен методами машинного обучения;
5. восстановление параметров солнечной активности по историческим наблюдениям Цюрихской обсерватории и каталогам О. Флоржера.

Несмотря на значительную широту рассмотренных вопросов, отдельные направления исследования объединены общей идеей построения количественного, компактного и физически содержательного описания сложных процессов и структур солнечной активности.

Основные научные результаты и их новизна

В теоретической части работы разработан аналитический метод оценки скоростей роста статистических моментов векторных полей в случайной среде с конечным временем памяти. Исследование начинается с анализа уравнения Якоби со случайным параметром кривизны, решение которого сводится к изучению произведений случайных матриц. На этом модельном примере исследованы различные механизмы возникновения неустойчивости и получены аналитические оценки скоростей роста поля и его

статистических моментов.

Разработанный подход затем применён к задаче начальной стадии магнитогидродинамического динамо. Получены оценки скоростей роста магнитного поля и магнитной энергии в изотропной и осесимметричной анизотропной случайной среде. Определены пороговые значения числа Струхала, характеризующие область применимости аналитических приближений, и показано согласие полученных оценок с результатами прямого численного моделирования. В пределе малого времени памяти результаты согласуются с известными оценками, полученными в приближении коротких временных корреляций. Исследованы также относительные вклады резонансных эффектов и перемежаемости в рост статистических моментов векторных полей.

Эти результаты расширяют возможности аналитического исследования начальной стадии динамо и позволяют рассматривать статистические свойства случайного поля скоростей, выходящие за рамки стандартных изотропных и коротко-коррелированных моделей. Важным результатом работы является разработка нового подхода к ассимиляции наблюдательных данных в моделях солнечного динамо на основе нейро-дифференциальных уравнений. В качестве примера рассматривается маломодовая модель, параметрами которой являются динамо-число и функция подавления альфа-эффекта. Неизвестная функция подавления представляется нейронной сетью, а её параметры оптимизируются совместно с динамо-числом и начальными условиями. Градиенты целевой функции вычисляются с помощью сопряжённой системы дифференциальных уравнений.

На синтетических данных показано, что один и тот же наблюдаемый профиль может воспроизводиться при различных сочетаниях динамо-числа и функции подавления альфа-эффекта. Вариативность восстанавливаемых параметров оказывается наибольшей при использовании только ограниченного набора данных и существенно уменьшается при добавлении информации о различных компонентах магнитного поля. При этом восстановленные функции подавления приближаются к исходной функции. Метод применён также к среднему профилю наблюдаемых циклов солнечной активности. Показано, что нейро-дифференциальная модель позволяет воспроизвести характерную асимметричную форму солнечного цикла с быстрой фазой роста и более медленной фазой спада. Одновременно сохраняется существенная вариативность динамо-числа и функций подавления, обеспечивающих близкое согласие с наблюдениями.

Этот результат имеет существенное физическое и методологическое значение. Он демонстрирует перспективность нейро-дифференциальных моделей для ассимиляции солнечных наблюдений, но одновременно показывает, что согласие модельного решения с наблюдаемым циклом ещё не обеспечивает однозначного восстановления физических параметров. Для уменьшения такой вырожденности требуется использование более полного набора наблюдательных ограничений.

Значительная часть диссертации посвящена автоматической сегментации корональных дыр. Разработана модель на основе свёрточной нейронной сети типа U-Net, обученная на изображениях SDO/AIA в канале 193Å и эталонных картах корональных дыр Кисловодской горной астрономической станции. На вход модели поступает изображение солнечного диска, а результатом является карта вероятности

принадлежности каждого пикселя корональной дыры. Показано высокое соответствие результатов нейросетевой сегментации эталонным картам, выполнено сравнение с другими автоматическими методами и разработан способ применения модели к синоптическим картам. На основе сформированного однородного ряда карт корональных дыр проведён анализ их физических свойств и эволюции. Установлена асимметрия между северным и южным полушариями в стадиях развития и амплитудах корональных дыр. Показано, что основной вклад в долговременные вариации скорости солнечного ветра вносят низкоширотные корональные дыры. Исследование широтно-временного распределения магнитного поля внутри корональных дыр указывает, что формирование полярных корональных дыр не может объясняться исключительно переносом магнитного потока из низких широт и, вероятно, включает дополнительные механизмы.

Другим новым направлением является параметрическое описание геометрической структуры групп солнечных пятен. В работе задача формулируется как задача понижения размерности изображений. Для её решения используются свёрточный вариационный автоэнкодер и метод главных компонент. Получен компактный набор латентных параметров, позволяющий восстанавливать исходное изображение группы и проводить количественное сравнение групп между собой. Показано, что отдельные латентные параметры связаны с физически интерпретируемыми характеристиками групп пятен, включая площадь, протяжённость, угол наклона, а также однопятенную или многопятенную структуру. Исследована зависимость точности восстановления изображения от числа используемых параметров.

На основе нового параметрического описания предложена количественная оценка сложности геометрической структуры групп солнечных пятен. Проведено сопоставление с Цюрихской системой классификации и показано, что новые параметры позволяют с достаточно высокой точностью оценивать класс группы. Полученные результаты могут быть использованы для исследования эволюции активных областей, совершенствования автоматической классификации и разработки более точных моделей прогноза солнечных вспышек. Значительный самостоятельный результат составляет разработка методов оцифровки и анализа исторических наблюдений. Для обработки рукописных каталогов Цюрихской обсерватории создана свёрточно-рекуррентная нейронная сеть. Разработанная процедура включает выделение ячеек таблиц, определение типа наблюдавшегося объекта, распознавание записанных координат, использование связей между столбцами каталога, оценку уверенности распознавания и автоматическое дообучение модели с учётом изменений почерка и особенностей отдельных страниц. На тестовой части выборки точность распознавания составила 97%.

В результате восстановлены координаты солнечных пятен, факелов и протуберанцев конца XIX - начала XX века. Сопоставление с каталогом Гринвичской обсерватории показало высокую согласованность восстановленных координат солнечных пятен. Построенные широтно-временные диаграммы позволили выявить особенности активности во время столетнего минимума: различия фаз полярной миграции факелов в северном и южном полушариях, высокую корреляцию числа пятен и протуберанцев в солнечных циклах 13 и 14, а также аномально низкое отношение этих индексов в цикле 15.

Отдельная часть исследования посвящена реконструкции наблюдений французского астронома О. Флержера в период минимума Дальтона. Автором восстановлены

конфигурации и ориентации использовавшихся наблюдательных сеток и разработаны методы определения гелиографических координат по транзитным наблюдениям. Точность методики оценивалась, в частности, по записям прохождения Меркурия и наблюдениям солнечных затмений. В результате восстановлены координаты 527 положений солнечных пятен для 154 дней наблюдений. Получены свидетельства существования долгоживущих групп пятен, наблюдавшихся более одного солнечного оборота, подтверждена северо-южная асимметрия активности и получены новые данные об аномальной продолжительности цикла 4. Автор корректно отмечает, что отсутствие измерений в 1793–1794 годах не позволяет сделать однозначный вывод о существовании короткого «потерянного» цикла между циклами 4 и 5.

Таким образом, научная новизна работы определяется не только применением современных методов машинного обучения, но и постановкой и решением ряда новых физических и методологических задач: аналитическим исследованием роста магнитных полей в случайных средах с конечной памятью, восстановлением параметров динамо-моделей по наблюдениям, созданием однородных каталогов корональных дыр, построением компактной параметризации групп солнечных пятен и извлечением новой информации из исторических наблюдений солнечной активности.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертации определяется развитием методов исследования начальной стадии магнитогидродинамического динамо и разработкой нового подхода к ассимиляции наблюдательных данных в динамические модели. Полученные аналитические оценки позволяют сопоставлять эффективность различных механизмов роста магнитного поля, учитывать конечное время памяти и анизотропию случайной среды и проводить независимую проверку результатов численного моделирования.

Разработанный нейро-дифференциальный подход открывает возможности для восстановления неизвестных параметров и функциональных зависимостей в моделях солнечного динамо. Существенным теоретическим результатом является установленная неединственность параметров, обеспечивающих близкое воспроизведение наблюдаемого солнечного цикла. Это показывает необходимость привлечения дополнительных наблюдательных данных и физических ограничений при калибровке динамо-моделей.

Практическая значимость диссертации состоит в создании работающих методов, алгоритмов, программных комплексов, каталогов и информационных ресурсов. В открытом доступе представлены программные средства для чтения и обработки наблюдений солнечной активности, сегментации корональных дыр, построения синоптических карт, параметризации групп солнечных пятен, обучения нейро-дифференциальных моделей и оцифровки архивных материалов. Созданы каталоги корональных дыр, параметров групп солнечных пятен, исторических координат пятен, факелов и протуберанцев, а также наборы размеченных рукописных данных.

Особо следует отметить, что разработанные в диссертационной работе методы, алгоритмы и программы не ограничиваются исследовательскими прототипами, а внедрены в действующие информационно-аналитические системы. Они используются в реальном времени для автоматизированного получения, обработки, параметризации, визуализации и анализа корональных дыр, активных областей и других данных о

солнечной активности на интернет-порталах <https://sun.njit.edu> и <https://observethesun.com/>.

На портале **sun.njit.edu** создана интегрированная среда для анализа солнечных событий и активных областей, включающая оперативно обновляемые изображения солнечного диска, результаты автоматического выделения корональных дыр и синоптические карты. Портал обеспечивает доступ как к исходным наблюдениям, так и к рассчитываемым параметрам и подготовленным для научного анализа наборам данных. Портал **observethesun.com** используется для оперативного представления и анализа карт активных областей, индексов и других параметров текущей солнечной активности. Применение разработанных методов в действующих онлайн-системах свидетельствует о высокой степени их программной реализации, устойчивости и практической востребованности.

Таким образом, результаты диссертации используются не только для ретроспективного научного анализа, но и в непрерывном цикле обработки новых наблюдений. Это существенно повышает практическую ценность работы и демонстрирует готовность разработанных методов к применению в системах оперативного мониторинга солнечной активности и космической погоды. Разработанная модель сегментации корональных дыр сохраняет устойчивость при переходе от данных 24-го к данным 25-го цикла солнечной активности. На основе создаваемого ею однородного ряда были выполнены исследования физических свойств корональных дыр. Высокая корреляция их параметров со скоростью солнечного ветра открывает перспективу использования результатов в службах прогноза космической погоды. Практическую ценность имеют также методы оцифровки исторических наблюдений. Они позволяют расширить временной интервал прямого количественного исследования солнечной активности и могут быть адаптированы для обработки других архивных каталогов и коллекций астрономических наблюдений.

Обоснованность и достоверность результатов

Достоверность основных результатов обеспечивается сочетанием аналитических методов, численного моделирования, испытаний на синтетических данных, сопоставления с экспертной обработкой, сравнения с независимыми каталогами и проверки алгоритмов на данных, не входивших в исходные обучающие выборки. Аналитические оценки скоростей роста магнитного поля и его моментов сравниваются с результатами прямого численного моделирования. Показано согласие методов в установленной области значений числа Струхала и восстановление известных результатов в пределе короткого времени корреляции. Нейро-дифференциальный подход проверен на синтетических данных, для которых исходные параметры и функция подавления известны заранее. Проведено систематическое исследование зависимости точности и однозначности восстановления от полноты используемых данных о магнитном поле. Тестовые результаты сегментации корональных дыр независимыми автоматическими методами, проведенные в рамках международных программ, показало существенные преимущества методики автора. Устойчивость модели подтверждается её применением к наблюдениям следующего солнечного цикла и использованием в действующей системе оперативной обработки данных. Результаты оцифровки каталогов Цюрихской обсерватории проверены путём сравнения восстановленных координат солнечных пятен с данными Гринвичской обсерватории. Для наблюдений О. Флоржера точность реконструированных методов оценивалась по независимым астрономическим

событиям, включая прохождение Меркурия по диску Солнца и солнечные затмения.

По материалам диссертации опубликовано 25 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК, включая работы в *Physical Review E*, *Astrophysical Journal*, *Solar Physics*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *Успехи физических наук* и других ведущих профильных изданиях. Результаты работы были представлены более чем на 30 российских и международных научных конференциях и симпозиумах. Широкая публикация исходных кодов, каталогов и наборов данных способствует воспроизводимости результатов, позволяет проводить независимую проверку разработанных методов и создаёт основу для их дальнейшего развития и интеграции в другие системы.

Замечания

При общей высокой оценке диссертационной работы представляется целесообразным высказать следующие замечания.

1. Работа охватывает широкий круг задач - от теории случайных матриц и начальной стадии динамо до нейросетевой сегментации изображений и оцифровки исторических каталогов. Эти направления объединены общей идеей параметрического описания, однако в автореферате можно было бы более подробно сформулировать общие критерии полноты, устойчивости и физической информативности параметризации, применимые ко всем рассмотренным задачам.
2. Показано, что широкий диапазон динамо-чисел и функций подавления альфа-эффекта может обеспечивать близкое воспроизведение наблюдаемого среднего цикла. Представляет интерес вопрос о том, какие дополнительные наблюдательные величины наиболее эффективно уменьшают обнаруженную вырожденность.
3. Большинство разработанных моделей обучается на наблюдательных или модельных примерах. Было бы полезно подробнее обсудить возможность включения законов сохранения, магнитной топологии, пространственно-временной непрерывности и других физических ограничений непосредственно в модели или функцию потерь. Сам автор отмечает физически-информированные нейронные сети как перспективное направление дальнейших исследований.
4. Модель корональных дыр продемонстрировала устойчивость при переходе от 24-го к 25-му солнечному циклу. Вместе с тем представляет интерес количественная оценка её переносимости между различными инструментами, спектральными каналами, уровнями пространственного разрешения и процедурами калибровки.
5. Для методов оцифровки и восстановления координат было бы полезно более явно проследить распространение ошибок - от распознавания отдельных рукописных записей и реконструкции наблюдательной геометрии до итоговых широтно-временных диаграмм и выводов о продолжительности и амплитуд солнечных циклов.
6. Поскольку созданные методы применяются для обработки данных в реальном времени, представляет интерес более подробное описание контроля качества автоматически формируемых данных, обработки пропусков в данных и инструментальных изменений, тестирования моделей и процедуры повторной обработки архивных данных при обновлении алгоритмов.

Перечисленные замечания имеют преимущественно дискуссионный характер, относятся к возможным направлениям развития проведённых исследований и не снижают общей высокой оценки диссертации.

Заключение

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации, основные использованные методы и полученные результаты. Диссертационная работа Е. А. Илларионова представляет собой завершённое комплексное исследование, содержащее новые теоретические результаты в области начальной стадии магнитогидродинамического динамо, оригинальный метод ассимиляции наблюдательных данных в моделях солнечного динамо, новые алгоритмы обработки солнечных изображений и существенные результаты по восстановлению исторических наблюдений солнечной активности.

Работа характеризуется актуальностью, научной новизной, значительным объёмом выполненных исследований, обоснованностью выводов и высокой теоретической и практической значимостью.

Существенным достоинством диссертации является сочетание фундаментальных исследований с разработкой практически действующих программных средств и информационных систем. Созданные методы, алгоритмы и программы не только опубликованы и представлены в открытом доступе, но и внедрены в действующие интернет-системы **sun.njit.edu** и **observethesun.com**, где используются в реальном времени для автоматизированной обработки, визуализации и анализа корональных дыр, активных областей и других данных о солнечной активности. Это демонстрирует практическую завершённость работы, устойчивость разработанных алгоритмов и их востребованность для задач оперативного мониторинга Солнца и космической погоды.

На основании представленного автореферата можно заключить, что диссертационная работа **«Параметрическое описание процессов и явлений солнечной активности»** соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а её автор, Илларионов Егор Александрович, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия».

Рецензент:

Косовичев, Александр Георгиевич

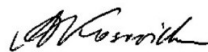
Д.ф.м.н, профессор

Технологический Институт Нью Джерси

Почтовый адрес: Ньюарк, США

Телефон: (001) 408-239-6874

Электронная почта: alexander.g.kosovichev@njit.edu



/ А.Г. Косовичев

«14» августа 2026 г.