

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук

Ильина Антона Сергеевича

на диссертационную работу **Илларионова Егора Александровича**

«ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Современная физика Солнца изучает сложнейшие нелинейные процессы, происходящие в солнечной плазме, которые в совокупности называются солнечной активностью. Эти процессы, в конечном счете, связаны с генерацией, эволюцией и распадом магнитного поля солнечной плазмы. Главные проявления этих процессов, которые можно непосредственно наблюдать — это солнечные пятна, вспышки и корональные выбросы массы (КВМ), корональные дыры, факелы, протуберанцы и волокна, и другие структуры, так или иначе связанные с магнитными полями в разных слоях солнечной плазмы.

В настоящее время, наблюдения за солнечной активностью привели к появлению огромного массива данных, интерпретация которых просто невозможна обычными «ручными» методами. В связи с этим возникла острая потребность в методах параметрического описания, и машинного обучения, разработке которых и посвящена диссертация Е.А. Илларионова.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ

Актуальность диссертационной работы Илларионова Е.А. не вызывает сомнений и подтверждается тем, что

Во-первых, в современной физике Солнца накоплен огромный объем наблюдательных данных. Это и современные данные (спутники SDO, IRIS, наземные обсерватории), и исторические (архивы Цюрихской, Гринвичской обсерваторий, каталоги О. Флоржера). Поток современных наблюдательных данных уже несопоставим с возможностями его ручной обработки, а стандартные автоматические процедуры часто уступают результатам ручной обработки. Поэтому требуется разработка новых подходов к анализу данных, способных работать с большими массивами информации.

Во-вторых, для правильного описания и, более того, прогнозирования солнечной активности необходимы модели, корректно учитывающие сложнейшие нелинейные процессы в солнечной плазме. Например, в теории солнечного динамо одним из наиболее сложных и обсуждаемых вопросов является проблема выбора функции подавления альфа-эффекта и подбора параметров моделей на основе наблюдательных данных. Автор указывает, что современные методы машинного обучения позволяют вывести этот процесс на качественно новый уровень, открывая возможности для подгонки теоретической модели под реальные астрономические наблюдения и решить «вечную» проблему замыкания системы уравнений гидродинамики и магнитной гидродинамики (МГД) для турбулентной плазмы.

В-третьих, длительные ряды наблюдений солнечной активности, охватывающие более 400 лет, являются уникальным источником информации о долговременной изменчивости характеристик солнечной активности. Эти изменения происходят на масштабах, существенно превышающих стандартный 11-летний солнечный цикл Солнца, и включают в себя такие экстремальные режимы, как минимум Маундера и минимум Дальтона. Однако, как отмечает автор, большой пласт архивных данных представлен лишь в бумажных каталогах, а многое из того, что удалось отсканировать в электронный вид, для систематического анализа требует проведения трудоемкой процедуры оцифровки текста и зарисовок. Разработка эффективных методов автоматической оцифровки и реконструкции этих данных является без сомнения может сыграть важную роль в понимании природы солнечной цикличности.

Таким образом, диссертация **вполне актуальна** и посвящена решению фундаментальных задач теории динамо, проблеме обработки больших баз данных и разработке методов машинного обучения, в том числе на основе исторических наблюдений.

2. НАУЧНАЯ НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленная работа содержит новые результаты, имеющие важное значение для физики Солнца.

2.1. В части теории турбулентного динамо

Автором разработан теоретический метод оценки инкрементов роста статистических моментов векторных полей в рамках модели перемежаемой (мультипликативной) случайной среды с конечной памятью. Такие модели широко используются в магнитной гидродинамике при описании начальной (кинематической) стадии генерации магнитных полей. Заметим, что эта задача относится к общей теории случайных процессов и полей и является исключительно важной и одновременно сложной, достаточно заметить, что большинство работ по этой теме используют модель нулевого времени корреляции, т.е. гауссового и дельта-коррелированного шума. Автором впервые проведено систематическое исследование трех вариантов, приводящих к росту т.н. поля Якоби,

удовлетворяющего мультипликативному стохастическому уравнению второго порядка: во-первых, в средах со случайной отрицательной кривизной пространства, во-вторых, в средах, где идет чередования областей с положительной и отрицательной кривизной, и наконец, за счет резонанса в среде со строго положительной кривизной. Автор количественно оценил относительную эффективность этих механизмов, это является важным вкладом в теорию неустойчивостей в случайных средах.

Эти результаты автор далее применил в задаче про рост магнитного поля (и магнитной энергии) на начальной, кинематической стадии динамо, когда можно пренебречь обратным влиянием поля на турбулентную плазму. В частности, получены аналитические оценки для инкрементов роста магнитной энергии в анизотропной (но осесимметричной) модели случайного потока для двумерного и трехмерного случаев. Эти результаты важны, так как позволяют выйти за рамки наиболее простых и, поэтому, популярных изотропных моделей.

В частности, автор показывает, что в пределе малого времени корреляции полученные оценки согласуются с классическими результатами, полученными в рамках дельтакоррелированного приближения А.П. Казанцева. Кроме того, важным результатом является демонстрация того факта, что зеркальная асимметрия случайного потока не дает вклада в эволюцию замороженного магнитного поля на начальной стадии динамо, что вносит некоторую ясность в понимание роли спиральности на разных этапах процесса динамо.

2.2. В части поиска эффективного алгоритма адаптации данных в моделях турбулентного динамо

Предложен новый подход к калибровке динамо-моделей на основе нейродифференциальных уравнений. На примере т.н. маломодовой (малоразмерной) модели динамо поставлена и решена задача восстановления вида т.н. функции подавления альфа-эффекта непосредственно исходя из наблюдательных данных. Это было сделано с использованием нейронных сетей, параметры которых оптимизировались методом сопряженных уравнений.

Главным результатом является демонстрация того, что существует весьма широкий спектр значений динамо-числа и профилей функции подавления, дающих близкое согласие с целевыми данными. Впервые количественно охарактеризован этот разброс и показано, что он существенно уменьшается, если использовать более полную информацию о магнитном поле. Этот результат имеет большое значение для теории динамо, так как он демонстрирует степень недоопределенности задачи и указывает пути повышения точности восстановления параметров.

2.3. В области обработки наблюдательных данных

Разработана модель сегментации корональных дыр на основе сверточной нейронной сети типа U-Net, обученная на эталонных примерах ручной обработки. Автором показано, что модель, обученная на изображениях солнечного диска, может быть успешно применена

для сегментации корональных дыр на синоптических картах без дополнительного дообучения. Создан каталог синоптических карт корональных дыр за период 2010–2025 гг., на основе которого проведен анализ физических свойств корональных дыр и их связи с солнечным циклом.

Автором впервые был введен индекс (основанный на площадях низкоширотных КД), который дает высокую корреляцию с долгосрочными (сглаженными за несколько оборотов) вариациями скорости солнечного ветра (коэффициент корреляции до 0.94). При этом, для некоторых каталогов корональных дыр корреляция оказывается гораздо ниже. Это говорит о присутствии в них большого числа волокон, ошибочно отнесенных к корональным дырам. Таким образом, предложенный автором индекс позволяет оценивать релевантность различных каталогов, что имеет высокое практическое значение, например, для отбора данных при прогнозировании космической погоды.

2.4. В области параметризации активных областей

Автором предложен принципиально новый подход к параметрическому описанию геометрической структуры групп солнечных пятен, основанный на комбинации вариационного автоэнкодера и метода главных компонент (терминология автора). Впервые показано, что компактный набор из 285 параметров позволяет с высокой точностью восстанавливать детальную структуру группы солнечных пятен по ее сжатому представлению.

Показано, что среди вычисленных параметров содержатся параметры, имеющие вполне четкую физическую интерпретацию: первый параметр определяет конфигурацию группы (однопятенная или многопятенная), второй – размер и вытянутость, пятый – угол наклона группы. При этом зависимость параметра Z5 от широты воспроизводит закон Джоя, это является прекрасным примером успешного автоматического выявления физических закономерностей из данных.

Автором впервые предложен количественный метод оценки сложности геометрической структуры группы солнечных пятен, который основан на скорости убывания ошибки реконструкции с увеличением числа параметров. Показано, что эта оценка коррелирует с визуальной сложностью группы и стадией ее развития.

2.5. В области восстановления исторических данных

Впервые проведена полномасштабная оцифровка рукописных каталогов Цюрихской обсерватории (1887–1920 гг.) с восстановлением координат более 70 тысяч солнечных пятен, 395 тысяч факелов и 62 тысяч протуберанцев. Главной новизной является разработанный метод постраничной адаптации нейросетевой модели распознавания, основанный на использовании внутренних линейных связей между столбцами таблиц. Этот метод позволил существенно повысить точность оцифровки и «уверенность» модели в правильных ответах, что, несомненно, является важным шагом в развитии адаптивных методов машинного обучения для работы с весьма неоднородными историческими данными.

Также, впервые восстановлены гелиографические координаты 527 солнечных пятен по транзитным наблюдениям О. Флержера в период минимума Дальтона (конец XVIII – первая треть XIX века). Разработаны методы реконструкции координат для трех различных конфигураций сеток (прямоугольной, косой и ромбической), использовавшихся наблюдателем. Проведена верификация результатов с использованием наблюдений солнечных затмений и транзита Меркурия. На основе полученных данных построены широтно-временные диаграммы, позволившие уточнить характер солнечной цикличности в этот период.

3. ДОСТОВЕРНОСТЬ И ОБОСНОВАННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается несколькими факторами.

В части аналитических исследований (Глава 2) все полученные оценки строго обоснованы математически с использованием теории произведения случайных матриц, эргодических цепей Маркова и методов теории возмущений. Аналитические результаты подтверждены прямым численным моделированием, причем для каждого случая проведено моделирование на весьма представительных выборках (до 10^5 реализаций). Показано согласие аналитических приближений с численными данными для малых чисел Струхала ($s < 0.6$), что соответствует области применимости использованных асимптотических разложений.

В части моделей машинного обучения (Главы 3–5) использованы архитектуры нейронных сетей, хорошо зарекомендовавшие себя в смежных областях (U-Net, VAE, CRNN). Обучение проводилось на репрезентативных выборках с применением стандартных процедур аугментации данных и регуляризации для предотвращения переобучения. Точность моделей тщательно верифицирована на тестовых выборках, а также путем сравнения с независимыми каталогами и физическими параметрами. Например, для модели сегментации корональных дыр коэффициент Dice составил 0.81 на тестовом периоде.

В части восстановления исторических данных (Глава 6) использованы многоуровневые проверки: (1) использование внутренних линейных связей между столбцами таблиц для адаптации модели распознавания; (2) оценка уверенности модели для выявления потенциально ошибочных распознаваний; (3) сравнение полученных координат с независимыми каталогами (Гринвичская обсерватория); (4) верификация методов реконструкции по наблюдениям солнечных затмений и транзита (прохождения) Меркурия. Все это обеспечивает высокий уровень достоверности полученных данных.

4. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, семи глав (включая обзорную), заключения и библиографии (252 наименования). Объем работы составляет 357 страниц, содержит 132 рисунка и 24 таблицы. Такая структура полностью соответствует содержанию исследования и позволяет последовательно изложить полученные результаты.

Введение содержит обоснование актуальности, формулировку целей и задач, описание научной новизны, теоретической и практической значимости работы, а также перечень защищаемых положений и публикаций.

Глава 1 представляет собой обзор современного состояния исследований в области параметрического описания солнечной активности. В ней рассмотрены существующие подходы к изучению роста магнитных полей в случайных средах, проблемы калибровки данных в динамо-моделях, методы обработки наблюдательных данных и подходы к восстановлению исторических каталогов. Обзор написан на высоком научном уровне и демонстрирует глубокое знание автором предмета исследования.

Глава 2 посвящена развитию аналитических методов оценки роста векторных полей в мультипликативных случайных средах с перемежаемостью. Модель Якоби рассмотрена как основной пример, для нее получены показатели Ляпунова и инкременты роста статистических моментов для трех существенно различных сценариев роста. Предложен т.н. «метод расширенных матриц», позволяющий обобщить подход на случай произвольной размерности. Получены аналитические оценки для скорости роста энергии магнитного поля в изотропных и анизотропных моделях в двумерном и трехмерном случаях. Проведено сравнение с результатами численного моделирования.

Глава 3 посвящена применению нейродифференциальных уравнений для ассимиляции данных в динамо-моделях. Изложена методология нейродифференциальных уравнений и метода сопряженных уравнений для вычисления градиентов целевой функции. На примере маломодовой модели динамо показана возможность восстановления динамо-числа и функции подавления альфа-эффекта по некоторым синтетическим данным. Исследован расброс параметров модели при различной полноте данных. Продемонстрирована возможность восстановления параметров модели по среднему профилю солнечного цикла (сглаженного числа Вольфа).

Глава 4 посвящена выделению корональных дыр с использованием сверточных нейронных сетей. Описана архитектура U-Net и процедура обучения на данных Кисловодской горной астрономической станции. Проведен анализ качества выделения и сравнение с другими методами (SPOCA, CHIMERA). Показана возможность применения модели, например, к синоптическим картам. Проведен анализ физических свойств корональных дыр и их связи со скоростью солнечного ветра.

Глава 5 посвящена проблеме параметризации групп солнечных пятен. Описан подход на основе т.н. вариационного автоэнкодера и метода главных компонент. Проведен анализ

латентного пространства и показана интерпретируемость первых компонент. Предложены методы оценки сложности групп и их классификации. Рассмотрены дополнительные приложения: сжатие спектральных данных и прогноз протонных событий.

Глава 6 посвящена восстановлению исторических данных. В первой части описана оцифровка каталогов Цюрихской обсерватории с использованием адаптивной модели распознавания, основанной на внутренних связях данных. Представлены результаты оцифровки и широтно-временные диаграммы. Во второй части рассмотрена реконструкция координат пятен по наблюдениям О. Флержера в период минимума Дальтона. Описаны методы восстановления для различных конфигураций сеток и приведены результаты.

Заключение содержит обзор основных результатов и обсуждение перспектив дальнейших исследований.

5. ВОПРОСЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

При общем высоком уровне выполнения работы, вызывающем, безусловно, положительное впечатление, можно задать вопросы, носящие дискуссионный характер и не снижающие общей высокой оценки диссертации.

1. В работе рассматривается модель с обновлениями, где процесс полагается кусочно-постоянным на интервалах фиксированной длины Δ . Насколько жестким является это предположение? Рассматривалась ли возможность обобщения метода расширенных матриц на случай конечного времени корреляции с более гладкими корреляционными функциями (например, экспоненциальной), где модель с обновлениями является лишь приближением? Если да, то каковы основные трудности такого обобщения?
2. Модель Якоби с дельтакоррелированным шумом имела успешное применение в стохастической гидродинамике см. например DOI: 10.1103/PhysRevE.82.056324, где получены аналитические решения уравнения Якоби для изотропного гауссового, дельтакоррелированного поля скоростей. Возможно ли сравнить эти результаты с полученными автором результатами задачи с конечной памятью?
3. При выводе оценок для анизотропной модели предполагается, что параметры анизотропии близки к единице ($u \sim 1$, $L \sim 1$). Насколько устойчивы полученные аналитические выражения при существенном отклонении от изотропного случая, например, при $u \gg 1$ или $L \gg 1$, когда среда становится сильно анизотропной?
4. В главе 3 вариативность оценок параметров системы дифференциальных уравнений изучается только численно. Существуют ли статистические (аналитические) методы для нахождения доверительных интервалов для числа D и функции подавления.

6. ЛИЧНЫЙ ВКЛАД СОИСКАТЕЛЯ

Личный вклад соискателя в получение результатов, представленных в диссертации, является определяющим. Все основные результаты получены автором лично или при его решающем участии.

7. АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в 25 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, включая Physical Review E, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Solar Physics, The Astrophysical Journal, Успехи физических наук, Журнал экспериментальной и теоретической физики и другие. Результаты работы докладывались более чем на 30 международных и всероссийских конференциях, включая специализированные конференции по физике Солнца, магнитной гидродинамике и машинному обучению в гелиофизике.

Отдельно следует отметить создание и поддержку автором открытых репозиторий с исходным кодом моделей и созданных баз данных, что соответствует современным принципам воспроизводимой науки и открытых данных. Разработанные комплексы программ представлены в репозитории <https://github.com/observethesun/>, а созданные каталоги данных доступны по постоянным ссылкам.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ О СООТВЕТСТВИИ ДИССЕРТАЦИИ УСТАНОВЛЕННЫМ ТРЕБОВАНИЯМ

Диссертационная работа Илларионова Егора Александровича «ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ» является законченным, самостоятельным научным исследованием, выполненным на высоком теоретическом и методическом уровне.

В работе представлены новые научные результаты, совокупность которых может быть квалифицирована как крупное научное достижение в области физики Солнца и космической физики. Автором разработаны и обоснованы новые подходы к параметрическому описанию процессов солнечной активности, включая аналитические методы оценки роста магнитных полей в случайных средах, методы ассимиляции данных в динамо-моделях на основе нейродифференциальных уравнений, методы машинного обучения для обработки наблюдательных данных и методы восстановления исторических каталогов.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются обоснованными и достоверными. Новизна результатов подтверждена публикациями в ведущих международных журналах и апробацией на научных конференциях. Теоретическая и практическая значимость работы подтверждается созданием новых баз данных, разработкой программных комплексов и возможностью использования полученных результатов в системах прогноза космической погоды.

По своей актуальности, научной новизне, объему и практической значимости представленная работа полностью соответствует требованиям п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Илларионов Егор Александрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории проблем физики космоса
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института имени П.Н. Лебедева
Российской академии наук

Ильин Антон Сергеевич

Контактная информация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.
П.Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53
Тел.: +7 (495) 132-62-89
E-mail: iljin@lebedev.ru

Официальный оппонент, доктор физ.-мат. наук

Ильин А.С.

Подпись А.С. Ильина заверяю:

Ученый секретарь ФГБУН ФИАН
кандидат физ.-мат.

2.09.2026



Колобов А.В.