

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертационную работу
Егора Александровича Илларионова
«Параметрическое описание процессов и явлений солнечной активности»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

В современную эпоху многоспутниковых измерений, гелиофизика сталкивается с ростом объема наблюдательных данных. Прибор AIA/SDO делает снимки Солнца каждые 12 секунд, а ежедневный поток информации со спутника сопоставим с десятилетиями исторических наблюдений. Однако и ревизия исторических архивов подчас удивляет многообразием источниками прямых солнечных наблюдений в рукописной форме. Возникновение «больших данных» требует перехода от ручных и полуавтоматических методов обработки к вычислительным подходам, способным извлекать полезную физическую информацию из массивов данных на уровне эффективности экспертов-наблюдателей. **Актуальность** данного направления высока, а задачи этого направления требуют междисциплинарного подхода, сочетающего методы математической физики, машинного обучения и анализа наблюдений.

В диссертационной работе представлен целый комплекс методов машинного обучения для широкого спектра задач: (i) для оценки скорости роста магнитной энергии на начальных этапах динамо, (ii) для оптимизации функции подавления альфа-эффекта в задаче максимизации соответствия решения динамо модели и среднего профиля цикла активности, (iii) для сегментации корональных дыр и параметрического описания структуры групп пятен, (iv) для восстановления солнечной активности по архивам наблюдений. Полученные результаты имеют как высокую теоретическую **значимость**, так и практическую **ценность** для создания систем прогнозирования космической погоды.

Новизна научного исследования и результатов

Диссертационная работа представляет собой комплексное исследование, в котором **впервые** предложен и реализован ряд принципиально **новых** подходов, не требующих постобработки выходных данных моделей. За счет усовершенствования архитектуры сети, схем обучения или обучающей выборки, диссертант добивается работы методов на уровне эксперта.

Сложность и объем ряда **новых** фундаментальных моделей и комплексов программ потребовали привлечение ресурсов суперкомпьютерного комплекса Ломоносов-2 Московского государственного университета. **Особо ценным** является то, что комплексы программ и базы данных с их описанием, 14 наименований, выложены в открытый доступ. Опыт и навыки Егора Александровича оказались востребованы во многих научных коллективах под руководством ведущих ученых, среди которых Дмитрий Дмитриевич Соколов, Андрей Георгиевич Тлатов, Александр Георгиевич Косовичев, Ирина Николаевна Киташили, Алексей Анатольевич Певцов, Райнер Арльт и др.

Достоверность полученных результатов

Диссертант очень скрупулезно подходит к демонстрации стабильности работы предложенных процедур и проверке достоверности полученных результатов. Так

подходы к сегментации корональных дыр «обкатаны» на изображениях диска Солнца, на синоптических картах и на отдельных примерах сложных корональных дыр. Показано, что процедуры выделения корональных дыр устойчивы к вариациям параметров построения синоптических карт. Также особо тщательная многоуровневая проверка достоверности реконструированных положений пятен выполнена для наблюдений О. Флджерга в период минимума Дальтона. Достоверность всех результатов подкреплена публикациями в высокорейтинговых журналах с международным рецензированием и экспертным обсуждением на десятках конференций.

Практическая ценность

Относительно практической ценности диссертационной работы особо отмечу результаты четвертой главы диссертации, где созданы методы для сегментации корональных дыр по изображениям солнечного диска и синоптическим картам. Полученные ряды площадей корональных дыр имеют высокую корреляцию со скоростью солнечного ветра, что обеспечивает релевантность выбранного подхода и результатов. Также отмечу **ценность** использования данных Кисловодской горной астрономической станции в обучающих выборках и создание сайта для визуализации ежедневных рутинных наблюдений на станции.

Перейду к **содержанию** диссертации. Работа объемом 357 страниц состоит из введения, шести глав, и шести защищаемых положений, семистраничного заключения и списка литературы из 252-х наименований. С 2017 по 2026 г. работа прошла апробацию на 35 конференциях международного и всероссийского уровня. По материалам диссертации заявлено 25 работ, входящих в перечень ВАК изданий. В 12-ти публикациях Егор Александрович является первым автором. Стоит указать, что это не все публикации, например, ресурс Astrophysics Data System находит более 50 публикаций.

Во **введении** указаны все необходимые вводные данные, такие как основные цели, актуальные направления работы, результаты, выносимые на защиту, научная новизна, область применения результатов, апробация, список публикаций, публикации в СМИ, список грантов и наград, список разработанных и читаемых курсов лекций, семинаров и практикумов.

В **первой главе** представлен обзор существующих методов машинного обучения, среди которых выделяется концепция фундаментальных моделей, где при обучении используются искусственно составленные задачи, не требующие привлечения экспертов. В области физики Солнца такой моделью является открытая модель NASA-IMPACT Surya, обученная на данных аппарата SDO, в задачи которой входит прогнозирование космической погоды. Обсуждается применимость и эффективность моделей машинного обучения для теоретических задач физики Солнца, в частности кинематического динамо для однородного и изотропного поля скоростей. Описаны основные трудности и неопределенности численного моделирования и аналитического описания в динамо моделях. Рассмотрены вопросы вычисления скорости роста магнитного поля и магнитной энергии в зависимости от параметров среды. Изложена основная идея нейродифференциального подхода для ассимиляции наблюдательных данных и теоретической модели. Освящены трудности работы с большими объемами измерений и изображений. Представлен обзор работ попиксельного определения контуров корональных дыр по магнитограммам и изображениям в разных диапазонах длин волн. Указываются преимущества алгоритмов компьютерного зрения, основанного на нейронных сетях, по сравнению с традиционным подходом

порогового контрастирования. Сделан обзор направлений физики Солнца, где уже активно применяются модели машинного обучения. Проанализирован потенциал нейросетевого подхода в вычислении количественных физических характеристик пятнообразования по современным наблюдениям и историческим архивам данных. Для каждого из вышеперечисленных направлений обозначено какой прогресс был достигнут в рамках диссертационной работы.

Вторая глава посвящена оценке параметров роста векторных полей в случайных средах, а именно, разработан математический аппарат для оценки скоростей роста статистических моментов на начальной стадии динамо. Сначала рассмотрена геометрическая интерпретация простого модельного примера, предложенного Я.Б. Зельдовичем, для описания разбегания световых лучей в математической формулировке уравнения Якоби. Рассмотрено три сценария для параметра кривизны распределенного в отрицательной, положительной и симметричной относительно нуля области значений. Проведено сравнение относительной эффективности трех распределений. Показано, что самовозбуждение со случайными положительными скоростями роста является самым эффективным, а аналитические приближения согласуются с численными расчетами для малых времен памяти. Далее предложенный подход по оценке скорости роста векторного поля и его моментов перенесен на уравнения магнитной индукции в 2D и 3D постановке. Рассмотрены изотропная и анизотропная модели магнитного поля в случайной среде. Показано, что скорости роста не зависят от зеркальной асимметрии тензора турбулентных скоростей на начальной стадии динамо, при этом аналитическое и численное решения являются близкими при малых значениях числа Струхала. Выполнено сравнение полученных результатов с короткокоррелированным приближением и рассмотрено как меняется скорость роста магнитной энергии, если статистические свойства случайного потока имеют не гауссовское распределение.

Третья глава посвящена ассимиляции наблюдательных данных методом градиентной оптимизации для коррекции параметров динамо модели. На примере маломодовых моделей посредством нейродифференциальных уравнений подбирается функция подавления альфа-эффекта. Для оптимизации целевой функции в терминах машинного обучения вводится функция потерь и решается сопряженная система уравнений. Начальные условия и динамо-число представлены как неизвестные параметры, а функция подавления альфа-эффекта параметризуется с помощью модели полносвязной нейронной сети. Помимо этого, решается задача восстановления параметров модели по данным о действительной части полоидального и квадрате действительной части тороидального полей, а также для полного набора измерений магнитного поля. Продемонстрировано, что метод нейродифференциальных уравнений подбирает параметры, обеспечивающие близкое к целевому решение системы уравнений. В условиях недоопределенности информации о магнитном поле предложенный метод может находить множество вариантов для параметров системы. Обсуждается вопрос устойчивости решения при найденных параметрах и ограничения метода при его переносе с синтетических на реальные данные. Основной трудностью для маломодовой модели является воспроизведение вариаций мощности и длительности циклов, поэтому было выполнено воссоздание среднего профиля солнечного цикла, рассчитанного по 24-м циклам активности. Посредством нелинейного подавления альфа-эффекта с помощью модели нейронной сети была успешно воспроизведена асимметричная форма среднего солнечного цикла.

Четвертая глава посвящена разработке процедуры корректной сегментации корональных дыр на изображениях методами сверточной нейронной сети. Набор изображений представлен ежедневными снимками с инструмента SDO/AIA с 2010 по

2018 г., а карты контуров корональных дыр получены из архива Кисловодской горной астрономической станции, причем для визуализации рутинных наблюдений станции был создан сайт с интерактивной трехмерной моделью Солнца для каждого выбранного дня. Помимо Кисловодских данных ряд был дополнен результатами обработки наблюдений с шести других наземных и спутниковых обсерваторий, что обеспечивает столетнее покрытие данными. Решается задача подбора оптимального формата хранения и передачи данных, где информация о солнечных пятнах, флоккулах, волокнах и корональных дырах переводится в формат их контуров. Для составления обучающего каталога корональных дыр использована полуавтоматическая процедура, применяемая на наблюдательной станции. Полный набор содержит почти три тысячи изображений. Ставился ориентир, что параметры корональных дыр должны быть релевантны измерениям скорости солнечного ветра на околоземной орбите. Выполнено сравнение результатов с каталогом SPoCA-HEK и данными из базы OMNI. Обсуждается вклад событий корональных выбросов массы. Для низкоширотных корональных дыр в пределах 30° с усреднением по скользящему окну в один год получен коэффициент корреляции со скоростью солнечного ветра 0,9, что значительно превышает данную оценку для каталога SPoCA-HEK. Дискутируется вопрос о низкой корреляции высокоширотных корональных дыр и солнечного ветра. Для предотвращения эффекта переобучения модели была проведена процедура расширения обучающей выборки посредством случайных преобразований. Разработана модель сегментации корональных дыр основанная на сверточной нейронной сети с архитектурой типа U-Net, что позволило работать с изображениями любого размера. С использованием коэффициента сходства продемонстрировано преимущество разработанного подхода. Показана корректная работа метода для выделения корональных дыр вблизи полюса. Обсуждается вариативность границ отдельных корональных дыр, сегментированных девятью разными схемами, и способность методов отличать корональные дыры от волокон. Далее модель доработана для решения сегментации корональных дыр на синоптических картах (CNN сверточная нейронная модель), причем разработан и способ построения каталога синоптических карт по набору изображений. Проанализированы широтные и долготные диаграммы магнитных полей корональных дыр, выполнено сопоставление с методом пороговой сегментации.

Пятая глава посвящена параметрическому описанию структуры групп солнечных пятен на базе каталога Кисловодской горной астрономической станции. Решается задача понижения размерности данных для чего разрабатывается модель вариационного автоэнкодера, а для дополнительного сжатия латентных векторов применяется метод главных компонент. Продemonстрировано как меняется точность реконструкции изображения группы пятен в зависимости от количества главных компонент. Показано, что 285 компонент достаточны, чтобы восстановить 95% исходной вариации данных. Выполнено исследование связи компонент латентного вектора в низкоразмерном пространстве с реальными физическими параметрами групп пятен, такими как униполярность, биполярность, многопятенность, долготная вытянутость, тильт-угол, и др. Разработана автоматическая модель классификации групп пятен. Продemonстрирован высокий потенциал модели понижения размерности для задач описания профилей спектральных линий и ежедневного прогноза протонных событий.

Шестая глава состоит из двух разделов работы с историческими измерениями солнечной активности. **Первая часть** посвящена задаче автоматической оцифровки методами машинного обучения по рукописным каталогам Цюрихской обсерватории начала 20-го века (1883—1936 гг.). Для создания обучающего набора данных

разработан подход, основанный на искусственных вспомогательных задачах без участия экспертов. Проведена процедура настройки базовой модели распознавания рукописного текста с использованием тепловой карты. Для преодоления трудностей, связанных с шумом, измерением фона, почерка и пр. был разработан метод постраничной адаптации с точностью 99%. В результате были восстановлены координаты десятков тысяч пятен, протуберанцев и сотен тысяч факелов, что дополняет каталоги гринвичской обсерватории о положении центров групп пятен.

Вторая часть шестой главы посвящена восстановлению координат пятен в период минимума Дальтона по наблюдениям французского астронома О. Флержера. Описаны структура каталогов и методы наблюдения, выполнено восстановление координат пятен в прямоугольной, косой и ромбической сетке. Для проверки точности реконструированных значений координат пятен была выполнена реконструкция по наблюдениям солнечных затмений. Дополнительно оценка точности измерений проведена по наблюдениям транзита Меркурия по диску Солнца.

У меня нет существенных замечаний к диссертации. Все стадии исследований подробно изложены, показана их достоверность. После прочтения у меня возникли следующие **вопросы и рассуждения**:

- 1) Восстановленный средний профиль солнечного цикла хорошо аппроксимирует максимумы циклов (рис. 3.9), однако переоценивает глубину минимумов. В чем может быть причина?
- 2) На рисунке 6.21 показано, что измерения угла наклона линии движения Солнца при его восходе систематически больше, чем аналитические значения, при этом для захода Солнца такой тенденции нет. С чем это может быть связано?
- 3) Вызывает интерес большая группа солнечных пятен вблизи севера на рисунке 6.34. Поскольку астрономы, предположительно, стремились измерить положения самых значимых активных областей, то отсутствие измерений положения этой группы удивительно. Возможно, данная группа есть группа А-В-С, но в перевернутой и отраженной проекции, при наблюдении в более мощный телескоп, однако такая интерпретация также вызывает ряд вопросов.

В качестве **несущественных** отмечу следующие замечание:

- 1) В тексте присутствует множество опечаток. Однако, все опечатки несущественные и не затрудняют понимание материала. Единственная значимая неточность относится к рисунку 4.41, который является неполным и должен состоять из трех панелей.
- 2) Автор относит корональные дыры к классу активных областей. С точки зрения задачи сегментации такое обобщение допустимо, однако, по своей физической природе и характеристикам эти два понятия противоположны друг другу.
- 3) Качество изображений на рисунке 6.7 не позволяет сравнить оригинальные и распознанные данные. При обращении к каталогу 1893—1898, к сожалению, страница 1330 отличается от представленной.

По итогу оппонирования и оценки значимости защищаемых положений могу заключить, что соискатель степени доктора физико-математических наук Егор Александрович Илларионов является высококласным специалистом широкого профиля в области физики Солнца. Основной упор в работе сделан на разработку и применение методов машинного обучения к актуальным задачам теории и наблюдений. В рамках защищаемой работы разработаны нейросетевые подходы с

большим потенциалом. Высокой оценки достойны все полученные результаты, поскольку ставят достижения российской научной школы в области машинного обучения в астрофизике в первые ряды таких достижений всего мира.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Цели диссертации соответствуют полученным результатам, а результаты прошли апробацию на конференциях и полно отражены в публикациях в высокорейтинговых научных изданиях, входящих в перечень рецензируемых журналов, утвержденных ВАК. Тема диссертации соответствует заявленной научной специальности. Полученные результаты, выводы и защищаемые положения обоснованы и обладают практической ценностью.

Считаю, что представленная диссертация «Параметрическое описание процессов и явлений солнечной активности» удовлетворяет требованиям, предъявляемым в Положении о порядке присуждения ученых степеней, и предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, соответствует критериями, установленным в п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Егор Александрович Илларионов заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

Доцент Санкт-Петербургского государственного университета
д.ф.-м.н. Надежда Валерьевна Золотова
специальность 01.03.03 «Физика Солнца»

Физический факультет

Санкт-Петербургского государственного университета,
198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Ульяновская ул., д. 1.

тел.: +7-905-213-19-42; e-mail: n.zolotova@spbu.ru

18.08.2026



18.08.2026



Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей

Текст документа размещен
в открытом доступе
на сайте СПбГУ по адресу
<http://spbu.ru/science/expert.html>