

О Т З Ы В

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

Диссертационная работа Е. А. Илларионова дает решения теоретических и прикладных задач физики Солнца, объединенных в большинстве случаев применением машинного обучения на основе нейронных сетей, современного и непревзойденного по своей эффективности метода нелинейной регрессии.

В теории динамо утвердилась общая концепция происхождения цикла солнечной активности. Имеются количественные модели, в основном согласующиеся с наблюдениями. Однако функциональная зависимость моделей солнечного динамо от ключевых физических параметров остается в значительной степени неопределенной. Устранение этой неопределенности становится центральной задачей теории. Эта **актуальная** задача решена в диссертации Е. А. Илларионова методом ассимиляции наблюдений: критерием для машинного обучения модели динамо является соответствие наблюдаемому профилю солнечного цикла. Не менее **актуальным** является параметризация данных наблюдений солнечной активности. Прогресс в методах наблюдений привел к многократному увеличению скорости накопления и объема данных, быстрота обработки которых имеет важнейшее значение для прогноза космической погоды. Здесь на данный момент не видно альтернативы методам машинного обучения.

Текст диссертации состоит из введения, шести глав и заключения. Работа содержит 132 рисунка, 24 таблицы и **достаточно полный** список литературы из 252 наименований.

Во **Введении** определены цели работы, убедительно обоснована актуальность выбранной темы, показана новизна полученных результатов. Практическая значимость диссертационной работы подтверждена перечнем новых программ и баз данных, созданных в работах по диссертации.

Первая глава является подготовительной к изложению основных результатов диссертации. Здесь дан обзор существующих подходов. Критически обсуждается опыт их использования в физике Солнца и смежных областях, способы преодоления возникающих при этом трудностей и нерешенные проблемы.

Вторая глава содержит результаты исследования эволюции скалярного поля Якоби и векторного поля произвольной размерности в так называемой модели с обновлениями. Предложен общий метод расчета скоростей роста статистических моментов поля, который затем применен для вычисления скорости роста энергии магнитного поля (удовлетворяющего уравнению индукции). Показано, что аналитические результаты для малых

чисел Струхалю совпадают с численными расчетами для случаев, когда число Струхалю действительно мало (< 0.6). Расчеты проведены для изотропной среды и для случая анизотропии с одним выделенным направлением. Учет анизотропии качественно не меняет результаты, хотя имеются некоторые количественные изменения. Тем самым показано, что в астрофизических приложениях, где можно ограничиться приближенными оценками, учет анизотропии необязателен.

В **Третьей главе** диссертации представлены результаты применения метода машинного обучения в задаче ассимиляции данных наблюдений в моделях солнечного динамо. Важнейший для теории динамо альфа-эффект зависит от магнитного поля. Эта нелинейная зависимость представлена нейронной сетью. Параметры сети настраиваются в процессе машинного обучения так, чтобы расчетная форма магнитного цикла максимально близко соответствовала усредненному профилю наблюдаемых циклов солнечных пятен. В результате определена вариативность функции магнитного подавления альфа-эффекта, при которой цель машинного обучения достигается с высокой точностью. Работа выполнена для частной маломодовой модели динамо, но разработанный метод ассимиляции данных может быть применен и в более реалистичных детализированных моделях.

Последующие главы диссертации посвящены прикладным задачам параметризации данных наблюдений.

В **Четвертой главе** представлены результаты по сегментации корональных дыр на основе каталога Кисловодской горной астрономической станции и изображений SDO. Здесь также применяется машинное обучение, направленное на воспроизведение эталонной выборки ручной обработки данных. Создан сводный интернет-каталог карт солнечной активности (сайт observethesun.ru) и основанный на нем каталог синоптических карт. Разработаны программы сегментации корональных дыр на базе этих каталогов. Показана высокая корреляция полученных при машинной сегментации параметров корональных дыр с вариациями солнечного ветра. Этим определяется практическая значимость результатов диссертации по сегментации корональных дыр для прогноза космической погоды.

Пятая глава посвящена задачам машинной параметризации геометрической структуры групп солнечных пятен. Методами машинного обучения на многолетних рядах изображений групп солнечных пятен Кисловодской горной астрономической станции определен ряд базовых параметров для полного, но более компактного по сравнению с исходными данными, представления их геометрической структуры. Новая компактная параметризация однозначно определяет физические параметры групп пятен, обычно используемые в физике Солнца, и значительно упрощает их количественное определение. Особого упоминания заслуживают представленные в этой главе диссертации методы прогноза событий высокоэнергичных солнечных частиц, основанные на моделях понижения размерности данных.

Последняя **Шестая глава** диссертации посвящена оцифровке двух источников исторических данных о солнечной активности: (1) каталогов Цюрихской обсерватории конца 19 – начала 20-го века и (2) каталогов французского астронома О. Флержера, охватывающих так называемый минимум Дальтона первой трети 19-го века. Каталоги различаются по своей структуре, и их оцифровка проводится раздельно. Здесь также применяются методы машинного обучения. Получены широтно-временные диаграммы солнечных пятен, факелов и протуберанцев, показывающие особенности солнечной активности в период столетнего солнечного минимума 19-20 веков. Восстановлены координаты более 500 солнечных пятен в период минимума Дальтона 18-19 веков. Выполненная оцифровка каталогов солнечных данных, разумеется, упрощает будущие работы с ними.

В **Заключении** перечислены основные результаты диссертации. Сформулированы выводы. Обсуждаются перспективы новых методов машинного обучения и основанного на нем параметрического описания процессов и явлений в физике Солнца.

Новизна диссертационной работы не вызывает сомнений. Методы машинного обучения, основанные на применении нейронных сетей, вошли в практику научных исследований лишь в последние 10-15 лет. Диссертация Е.А. Илларионова представляет один из первых опытов их применения в физике Солнца, подтверждает их высокую эффективность и тем самым формирует новое направление в исследовании солнечной активности. Впервые внедрен метод нейродифференциальных уравнений в практику ассимиляции данных наблюдений в моделях динамо. Предпринята первая попытка определения функции магнитного подавления альфа-эффекта напрямую из данных наблюдений солнечных циклов. Результаты по сегментации корональных дыр, машинной параметризации геометрической структуры групп солнечных пятен и оцифровке рукописных каталогов данных о солнечной активности в далеком прошлом также являются новыми.

Достоверность результатов диссертации определяется тем, что все результаты и защищаемые положения полностью опубликованы в рецензируемых отечественных и зарубежных изданиях, рекомендованных ВАК. Научное сообщество ознакомлено с результатами диссертации, доложенными на более чем 30 симпозиумах и конференциях. Программы расчетов тестированы и проверены сравнением с моделями других авторов и прямыми измерениями. В диссертации использованы данные наблюдений из надежных источников хорошо зарекомендовавших себя астрономических обсерваторий и космических аппаратов.

В работах, на которых основана диссертация, разработаны комплексы программ обработки и анализа данных, представленных для открытого доступа в депозитарии github.com/obsrvethesum. Созданы и также представлены в открытом доступе новые базы данных. Оцифрованы и таким образом вовлечены в активное использование научным сообществом два

исторических рукописных источника данных о солнечной активности. Это определяет **практическую значимость** диссертационной работы.

В целом, изложенные в диссертации Е. А. Илларионова результаты исследований дают решения теоретических и прикладных задач, которые можно квалифицировать как **научное достижение в физике Солнца**.

Как, вероятно, к любой масштабной научной работе, к данной диссертации имеются вопросы и замечания, которые носят дискуссионный характер и, в основном, относятся к ее теоретической части:

1. Раздел (2.3), где получены общие правила для статистических моментов векторного поля в модели с обновлениями, отличается от раздела (2.4), где эти правила применяются к уравнению индукции магнитного поля, количеством независимых переменных. В разделе (2.3) единственная независимая переменная – это время. В разделе (2.4) к ней добавляются пространственные координаты. Зависимость от координат входит в полную лагранжеву производную по времени уравнения (2.33). Поэтому формальное совпадение вида уравнений (2.24) и (2.33) не дает достаточных оснований для применения к последнему общих правил раздела (2.3). Такое применение огрубляет уравнение индукции, заменяя полную производную по времени частной производной, и требует дополнительного обоснования. Возможно, с этим связан вывод об отсутствии эффектов гидродинамической спиральности в динамике магнитного поля (стр. 66), который не согласуется с теорией динамо и требует более детального обсуждения и объяснения, чем это сделано в диссертации.
2. Текст диссертации оставляет неясным происхождение маломодовой модели раздела 3.2. Ссылка на работу [163] из списка литературы ясности не добавляет. Там нет вывода уравнений модели.
3. В Главе 3 представляется уместным сравнение с аналитической теорией магнитного подавления альфа-эффекта. К сожалению, такое сравнение отсутствует в диссертации.

Указанные недостатки не меняют общего положительного впечатления от диссертации и не снижают ее высокой оценки.

Все результаты диссертации опубликованы в 25 статьях в изданиях, включенных в список ВАК, или индексируемых в международных библиографических базах Web of Science и Scopus.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации и позволяет достоверно судить о ее качестве.

Диссертационная работа **«Параметрическое описание процессов и явлений солнечной активности»** представляет законченное исследование, обладающее научной новизной и имеющее теоретическую и практическую ценность. Диссертация соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (№842 от 24.09.2013), а ее автор – **Илларионов Егор Александрович** – заслуживает присуждения

ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Кичатинов Леонид Леонидович,
доктор физико-математических наук (специальность 01.03.03 – Гелиофизика и физика солнечной системы), главный научный сотрудник Отдела радиоастрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск.

Почтовый адрес: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А.
E-mail: kit@iszf.irk.ru; тел.: 8-(395)-242-82-65

Я, Кичатинов Леонид Леонидович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
доктор физ.-мат. наук



Л. Л. Кичатинов

Подпись доктора физ.-мат. наук Кичатинова Л. Л. заверяю.

Ученый секретарь ИСЗФ СО РАН,
к.ф.-м.н.
26.08.2026



И. И. Салахутдинова