

УТВЕРЖДАЮ



Директор ИЗМИРАН
кандидат физ.-мат. наук

А.А. Абунин
2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук**

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/

Диссертация Е.А. Илларионова обладает важным свойством, которое позволяет рассматривать ее как решение важной научной задачи, имеющей народно-хозяйственное значение. Она решает проблему, которую нельзя не решить и, в то же время, решает ее неожиданным образом, заставляющим пересмотреть связанные с ней области науки. В самом деле, объем и сложность современных наблюдательных данных о солнечной активности столь велик, что их невозможно обработать традиционными методами в сроки, совместимые с требованиями краткосрочного прогноза солнечной активности и далее – космической погоды. Это определяет необходимость так или иначе автоматизировать процесс обработки и осмысления наблюдательных данных и введение их в контекст теории. Представляется, что диссертанту удалось найти такое решение, которое объединяет достоинства автоматической и традиционной обработки и осмысления данных о солнечной активности. Естественно, предлагаемый подход основан на глубоком понимании специфики задачи и тщательном использовании огромного имеющегося опыта традиционных подходов.

Актуальность работы определяется двумя аспектами: фундаментальным и прикладным.

Во-первых, несмотря на общую сложившуюся концепцию и построенные феноменологические и математические модели солнечного магнитного динамо, многие важные особенности этого механизма еще не окончательно определены и не описываются на количественном уровне. Методом машинного обучения и

сравнения с уравнениями динамо удалось уточнить ряд характеристик процесса. Выполненное в других главах параметрическое описание процессов и явлений солнечной активности позволяет проводить более точное сравнение с характеристиками, следующими из теории этих процессов.

Во-вторых, измерение и изучение корональных дыр и активных областей позволяет развить новые подходы к пониманию их физики и методы их прогнозирования. Это важно в связи с развитием космических исследований, увеличением численности и сложности космических аппаратов, различных технологий и областей жизнедеятельности человека, подверженных влиянию обозначенных явлений.

В диссертации Илларионова Егора Александровича созданы новые методы и получены новые сведения, обеспечивающие развитие знаний о характеристиках солнечной активности и имеющие ценность как для фундаментальной науки, так и для прикладных работ по прогнозированию космической погоды.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, обзора существующих подходов, пяти глав, посвященных основным результатам, и заключения. Работа содержит 132 рисунка, 24 таблицы и 252 библиографические ссылки.

Рассмотрим более подробно защищаемые положения последовательно по главам диссертации, подчеркивая новое и важное в каждом защищаемом положении.

1. Проведена тщательная ревизия физического (и математического) смысла показателей роста, изучаемых в теории солнечного динамо. Эта работа актуальна в силу того, что солнечное динамо, как одно из явлений неустойчивости в случайной среде, сопровождается таким явлением, как перемежаемость, в силу которого рост магнитного поля не удается охарактеризовать только одним числом, а приходится использовать и сопоставлять различные характеристики этого роста, что далеко не всегда реально в рамках конкретных моделей солнечного динамо. Достаточно сказать, что теоретические представления о солнечном динамо основаны на представлении о среднем магнитном поле, отождествляемом с крупномасштабным магнитным полем, а в численном моделировании часто рассматривается детальное описание магнитного поля Солнца. Полученные автором результаты помогают сравнивать эти, вообще говоря, различные описания.

2. Предложен метод оценки управляющих параметров солнечного динамо в рамках ассимиляции данных. Конечно, во всех работах по солнечному динамо так или иначе оцениваются физические величины, ответственные за работу солнечного динамо. Однако до сих пор эта оценка носит характер прямолинейного подбора параметров, позволяющих получить желаемый режим работы динамо. При этом трудно понять, насколько широк диапазон возможных значений подбираемых параметров. Этот недостаток во многом устраняется в

предлагаемых оценках.

3. Предложен метод автоматического выделения корональных дыр, свободный от недостатков алгоритмов, базирующихся на явно сформулированных правилах, которые не могут учесть естественную вариативность явления. Этот метод уже практически используется в краткосрочном прогнозе солнечной активности. В научном плане подход следует современным принципам построения машинного перевода, которые на наших глазах совершили революцию в автоматическом переводе.

4. Поставлена на современную основу задача квантификации данных о форме солнечных пятен. Традиционно подобное описание опиралось на недостаточно формализованный многолетний опыт астрономов-наблюдателей. В отсутствии такой формализации трудно обеспечить регулярное наследование приемов работы между астрономами разных поколений и при комбинировании данных различных современных приборов, наблюдающих солнечную активность. Подчеркнем, что подобные трудности встречаются далеко не только в физике Солнца, но и во многих других областях науки, в которых актуально сопоставлять данные, полученные в разное время и в различных обстоятельствах (сопоставление различных гербарных листов в ботанике, удаленных друг от друга разрезов в геологии и многие другие). Естественно, что каждое подобное сопоставление должно отталкиваться от проблем и методов соответствующей науки, но развитый подход, как представляется, допускает разумное перенесение в другие области знания.

5. Разработанные диссертантом методы позволили (на примере цюрихских данных) научиться автоматически читать огромный накопившийся за десятилетия рукописный архив наблюдательных данных. Прочитать этот архив без помощи автоматизированных методов практически нереально в силу его огромного объема и проблем с чтением скорописи, сделанной в удаленные от нас эпохи. Без такой работы многие выводы долговременной эволюции солнечной активности опираются на прочтения, сделанные несколько десятилетий назад и опубликованные в то время недостаточно полно. Подчеркнем, что проделанное прочтение позволило уточнить и конкретизировать ряд важных деталей эволюции солнечной активности в удаленные от нас эпохи. Эти уточнения подробно и ясно изложены в диссертации.

6. Разработанный диссертантом подход позволил вернуть в научный оборот заметный пласт наблюдательной информации, относящейся к такой специфической эпохе солнечной активности, как минимум Дальтона. Речь идет о наблюдениях французского астронома Флержера, которые в общем были известны давно, но из-за крайне неудачного и запутанного представления данных служили в лучшем случае иллюстрацией того, почему не стоит изобретать нестандартные подходы при наличии опробованных стандартных. В результате работы диссертанта, использовавшего разработанные им подходы, удалось привести эти наблюдения в пригодный для использования вид и ввести в общий контекст исследований долговременных изменений солнечной активности. В итоге заметно

улучшились наши представления о минимуме Дальтона, который в ряде отношений напоминает циклы солнечной активности, происходящие непосредственно сейчас. В частности, это дополнение позволяет отвергнуть разнообразные алармистские интерпретации подобных минимумов и уверенно рассматривать их как интересные и важные для изучения, но не катастрофические явления.

В заключении даны основные выводы проведенных исследований. На основе обобщения полученных результатов кратко излагается предлагаемая автором качественная картина подповерхностной эволюции локальных магнитных полей на Солнце.

Научная новизна работы

Тематика работы – параметрическое описание процессов и явлений солнечной активности – определяет новое направление в методах изучения солнечной активности. В его основе – модели машинного обучения, которые связывают наблюдательные данные и физически параметры, и математические методы исследования моделей динамо. В работе впервые описан набор механизмов, приводящих к росту неустойчивости в уравнении Якоби со случайным параметром кривизны, и получены оценки скоростей роста. Предложенный метод вывода оценок позволил впервые получить оценки скоростей роста магнитного поля на начальной стадии динамо в изотропной модели случайного поля скоростей с обновлениями, а также выйти за ограничения изотропной модели и получить оценки скоростей роста для осесимметричной анизотропной модели. Впервые представлен подход на основе нейродифференциальных уравнений для ассимиляции наблюдательных данных в моделях динамо и сделан вывод вида функции подавления альфа-эффекта напрямую из наблюдательных данных. Впервые представлена модель на основе сверточных нейронных сетей для сегментации корональных дыр, обученная на эталонных примерах ручной обработки данных. Показана устойчивость результатов, проведен анализ физических свойств корональных дыр на однородном ряде данных и продемонстрирована высокая корреляция со скоростью солнечного ветра. Впервые получен набор параметров, описывающих детальную структуру групп солнечных пятен и расширяющий набор стандартных физических свойств. Показана применимость полученных параметров для решения прикладных задач. Впервые проведена оцифровка и реконструкция параметров солнечной активности из табличных каталогов Цюрихской обсерватории и каталогов О. Флержера. Получены новые подтверждения особенностей солнечной активности в периоды столетнего минимума и минимума Дальтона.

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов, выводов и заключений.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием наблюдательных данных хорошо зарекомендовавших себя инструментов (SDO/HMI, SOHO/MDI, HSOS), проверенных и опубликованных в печати многочисленными коллективами исследователей по всему миру. Для обработки наблюдательных данных использованы известные, апробированные и широко применяемые методы. Процедуры расчетов многократно тестированы, проведены сравнения с аналогичными программами других коллективов, проведено сравнение с теоретическими моделями и прямыми измерениями.

По материалам работы были сделаны доклады более чем на 30 научных конференциях и симпозиумах:

Результаты диссертации опубликованы в 25 статьях в изданиях, входящих в перечень ВАК:

Часть результатов, выносимых на защиту и опубликованных в рецензируемых изданиях, получена с соавторами. Про это указано в автореферате и диссертации. Личный вклад Илларионова Егора Александровича обозначен и бесспорен. Важность положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнений.

Илларионов Егор Александрович продемонстрировал серьезные навыки и умения, глубокие знания основ сложных аспектов математики и физики Солнца. Выполненное исследование носит комплексный характер. Оно включает разработку нового сложного математического аппарата, обработку больших массивов наблюдательных данных наземных и космических обсерваторий, обработку графических исторических записей и тщательную интерпретацию результатов на основе анализа обширной выборки тематической литературы. Важно, что предложенные решения не просто являются опубликованными научными статьями. Они внедрены в имеющуюся практику краткосрочного прогноза солнечной активности. Разработанные диссертантом методы оказываются востребованными ведущими российскими и иностранными специалистами.

Разработанные автором методы являются очень важным инструментом при решении проблем понимания и описания разнообразных явлений солнечной активности. Конечно, нельзя ожидать, что таким образом будет полностью решена проблема прогнозирования солнечной активности. Такая задача может быть решена только в соединении адекватных методов анализа и описания основных характеристик с достоверной теорией генерации магнитных полей и нестационарных процессов. Именно методы, развитые в диссертации и могут войти составной частью в этот процесс. Это важное соображение в целом согласуется с выводами диссертанта, но, к сожалению, нигде не сформулировано четко.

Еще одно сопоставление. Хорошо видно, что международное сообщество испытывает трудности с сохранением и обеспечением доступности архивных данных о солнечной и звездной активности, без которых невозможен долгосрочный прогноз солнечной активности. Постоянно приходится слышать об

угрозе утери важных архивных данных. Например, Парижская обсерватория потеряла архив Э. Нем-Риб, которой мы обязаны восстановлением из архивных записей большинства сведений о минимуме Маундера. В данном же случае мы видим обратную тенденцию: диссертант возвращает в научный оборот выпавшие из него архивные данные о солнечной активности в период минимума Дальтона, а также разрабатывает полезный сайт, позволяющий работать с архивными и актуальными наблюдательными данными. Конечно, современные данные спутниковых наблюдений Солнца очень важны, но без исторических данных их не с чем сравнивать.

Замечания по содержанию и оформлению

Диссертационная работа Илларионова Егора Александровича представляет собой завершенное научное исследование по актуальной тематике. Текст работы написан понятным языком, аккуратно и доходчиво изложен. Диссертация имеет четкую структуру. Автореферат полностью и корректно отражает содержание диссертации.

Существенных замечаний к диссертации Илларионова Егора Александровича нет. Имеется лишь небольшой перечень незначительных вопросов и замечаний:

1. Главным достоинством диссертации является применение тонких математических методов машинного обучения к решению ряда нерешенных физических задач солнечной физики. Результаты, несомненно, могут быть в дальнейшем изучены и интерпретированы. К сожалению, диссертант не всегда увязывает полученные выводы с прямыми гелиофизическими данными. Например, в Главе 2 проводится оценка параметров роста векторных полей в случайных средах. Вообще говоря, решение задачи восстановления параметров уравнения и характеристик среды путем подгонки под известный результат неоднозначно. При этом диссертант делает ряд предположений в основном математического характера, их физический смысл не всегда ясен. Выводы к этой главе имело бы смысл обсудить более подробно с физической точки зрения (стр. 91).

2. В разделе 5.5 проводится оценка сложности активных областей. Вообще говоря, понятие «сложность» неясно и неоднократно обсуждалось на лингвистических и физических симпозиумах. Сложность активной области – понятие с точки зрения опытного наблюдателя – вещь интуитивно понятная и легко определяемая, но с параметрической точки зрения до сих пор не определенная. Существуют десятки предложенных параметров (высокие значения градиентов поля и скорости, длина и степень извилистости нейтральной линии, расстояние между центрами противоположной полярности и т.п.). Диссертант предлагает свое определение, которое проистекает из процедуры метода параметризации структуры активных областей. После предварительной процедуры свертки выполняется поиск главных компонент. «Отсюда количество

компонент, при которых ошибка реконструкции становится меньше некоторого заданного уровня, можно считать оценкой сложности группы. Количественно будем оценивать сложность группы как число компонент вектора Z_1 , при котором, ошибка реконструкции составляет половину от ошибки, получаемой при использовании одной компоненты латентного вектора». По существу, мысль достаточно простая. Если уже самый первый вектор хорошо описывает группу, она считается простой. Однако поскольку этот метод является результатом довольно сложной математической обработки, имело бы смысл сопоставить его с другими, широко применяемыми в практике прогнозирования критериями. (стр. 213)

3. «Идея оценки каталога КД состоит в том, что корональные дыры в каталоге должны быть релевантны наблюдаемой скорости солнечного ветра» (стр. 124). С практической прогностической точки зрения этот критерий, может быть, и пригоден, тем более, что он прямо связывает корональную дыру с возможным геофизическим проявлением. Однако все-таки солнечный ветер (а еще точнее, скорость солнечного ветра) – это не есть принципиальный признак КД. На самом деле КД возникает как область открытого магнитного поля, хотя даже этот признак неоднозначный. Связь со скоростью солнечного ветра изучалась в десятках солнечных работ и она подтверждается только статистически при ряде дополнительных обстоятельств.

4. В целом диссертация написана довольно хорошо и читать и понимать ее несложно. Однако все-таки многовато опечаток. В большинстве случаев они не искажают смысл. Но есть и такие, которые изменяют его. Например:

«Чтобы получить интерпретацию конкретной компоненты Z_k , приравняем все компоненты, кроме Z_k ». Пропущено важное по смыслу слово «нулю» (стр. 202).

Разделение в основном объясняется значением латентного параметра Z_1 , однако для более точной классификации необходимо учитывать и параметр Z_1 . (подпись к рис. 5.9).

Функция активации упоминается впервые на стр. 101, но ее определение дано только позднее на стр. 135.

Эти замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Общее заключение

Диссертация Илларионова Егора Александровича «Параметрическое описание процессов и явлений солнечной активности» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему и удовлетворяет требованиям ВАК. Результаты, полученные в диссертационной работе, вносят существенный вклад в исследование магнитных полей и активности Солнца и могут использоваться в ИКИ РАН, ГАО РАН, ИЗМИРАН, КрАО РАН, ИСЗФ СО РАН, ГАИШ МГУ и в других отечественных и

зарубежных организациях, где проводятся работы по исследованию и прогнозированию магнитных полей на Солнце, солнечной активности, солнечно-земных связей и космической погоды.

Диссертация удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор Илларионов Егор Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на заседании научно-технического Ученого Совета ИЗМИРАН 16 июня 2026 года

В.Н. Обридко

Подпись В.Н. Обридко заверяю,
Учёный секретарь ИЗМИРАН
кандидат физ.-мат. наук



А.И. Рез

Отзыв составил
доктор физ.-мат. наук, профессор
В.Н. Обридко,
главный научный сотрудник
Отдела физики Солнца и солнечно-земных связей
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
Российской академии наук (ИЗМИРАН)

Сведения о ведущей организации

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

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	ИЗМИРАН
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Фамилия, имя, отчество руководителя организации	Абунин Артем Анатольевич
Почтовый индекс, адрес организации	108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4
Телефон	Тел. (495) 851-01-20
Адрес официального сайта в сети «Интернет»	http://www.izmiran.ru
Адрес электронной почты	izmiran@izmiran.ru

Основные публикации сотрудников ИЗМИРАН по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не менее 5 и не более 15 публикаций)

Библиографический список оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ.

1. Обридко В.Н., Наговицын Ю.А. Солнечная активность, цикличность и методы прогноза // СПб: Изд-во ВВМ. - 2017. - 466 с. ISBN 978-5-9651-1119-0.
2. Кудрявцев И.В., Дергачев В.А., Наговицын Ю.А. ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА ЗЕМЛИ В 13-15 ТЫСЯЧЕЛЕТИЯХ ДО НАШЕЙ ЭРЫ. ВОЗМОЖНАЯ ПРИЧИНА // Геомагнетизм и аэрономия. -2025. -Т. 65. -№ 4. - С. 538-541
3. Rogachevski I., Kleeorin N., Brandenburg A.I, Theory of the Kinetic Helicity Effect on Turbulent Diffusion of Magnetic and Scalar Fields // The Astrophysical Journal. - 2025. -985:18 (7pp). DOI: 10.3847/1538-4357/adcec0; 10.48550/arXiv.2501.13807 28.
4. Kleeorin N., Rogachevski I. Large-scale clustering of inertial particles in a rotating, stratified and inhomogeneous turbulence // Phys. Fluids. -2025. DOI: 10.1063/5.0270977
5. Obridko V.N., Abunin A.A., Georgieva K., Kirov B., Shelting B.D, Livshits I.M. Some characteristics of the transition period in solar activity // Geomagnetism and Aeronomy.

- 2020. - V. 60. - N. 8. -P. 1007–1016
6. Starchenko S. V. and Kotelnikova M. S. On the Simplest Solutions of the MHD Equations for the Total Magnetic Energy in the Convective Zone of Sun and Earth ISSN 1062-8738 // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. - 2025. - V. 89. - N. 7 - P. 1161–1164. © Pleiades Publishing, Ltd., 2025. . DOI:10.1134/S1062873825711869
 7. Zagainova Yu. S. and Fainshtein V. G. Study of the Magnetic Properties of Sunspots in Active Regions with Explosive Processes // Geomagnetism and Aeronomy. - 2022. - V. 62. - N. 8. - P. 1034–1044. DOI: 10.1134/S0016793222080242
 8. Nandy D., Martens P., Obridko V., Dash S. and Georgieva K. Solar evolution and extrema: current state of understanding of long-term solar variability and its planetary impacts // Space Science Reviews. - 2021. - V. 225. - N. 15. - P. 105743.
 9. Khabarova O., Malandraki O., Malova H., Kislov R., Greco A., Bruno R., Pezzi O., Servidio S., Gang Li, Matthaeus W., J. Le Roux, Engelbrecht N. E., Pecora F., Zelenyi L., Obridko V. & Kuznetsov V. Current Sheets, Plasmoids and Flux Ropes in the Heliosphere. Part I. 2-D or not 2-D? // General and Observational Aspects, Space Science Reviews. - 217, 38 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00814-x> (Q1)
 10. Pezzi O., Pecora F., le Roux J., Engelbrecht N.E., Greco A., Servidio S., Malova H.V., Khabarova O.V., Malandraki O., Bruno R., Matthaeus W.H., Li G., Zelenyi L.M., Kislov R.A., Obridko V.N., Kuznetsov V.D. // Current Sheets, Plasmoids and Flux Ropes in the Heliosphere: Part II: Theoretical Aspects, Space Science Reviews, 217, 39 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00799-7> (Q1)
 11. Obridko V. N. Large-scale magnetic field of the Sun: evolution of ideas. // Astronomical and Astrophysical Transactions. - 2021. - V. 34. - N.4
 12. Obridko V.N., Fainshtein V.G., Zagainova Yu.S. and Rudenko G.V. Magnetic Coupling of the Solar Hemispheres in the Extreme Phases of the Activity Cycle // Solar Physics. - 2020. - V. 295. - I. 11. DOI: 10.1007/s11207-020-01716-x
 13. Miroshnichenko L.I., Chuan Li, Yanke V.G. Small size Ground Level Enhancements during Solar Cycle 24. // Solar Physics. - 2020. - V. 295. - P. 102. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11207-020-01659-3>.
 14. Chowdhury P., Kilcik A., Yurchyshyn V., Obridko V.N., Rozelot J.P. Analysis of the Hemispheric Sunspot Number Time Series for the Solar Cycles 18 to 24 // Solar Phys. - 2019. 294:142, DOI:10.1007/s11207-019-1530-7

Исп.: Рез А.И.
Тел.: 8 (495) 851-09-09
E-mail: rez@izmiran.ru