

На правах рукописи



Илларионов Егор Александрович

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ
АКТИВНОСТИ

1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук

Москва
2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Официальные оппоненты:

Золотова Надежда Валерьевна

доктор физико-математических наук, доцент кафедры физики Земли Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Ильин Антон Сергеевич

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем физики космоса Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук

Кичатинов Леонид Леонидович

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

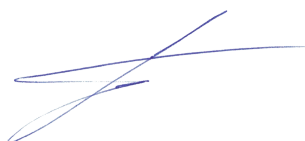
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук

Защита диссертации состоится «25» сентября 2026 года в 11 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 24.1.481.01 на базе ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, 2-й подъезд.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института космических исследований РАН и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2026/illarionov.htm>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.481.01,
к. ф.-м. н.



Ткаченко Алексей Юрьевич

Общая характеристика работы

Актуальность работы Задачи параметрического описания, перехода от качественного к количественному описанию процессов и явлений естественным образом возникают в теоретических и прикладных областях физики Солнца. Существующие способы в ряде важных случаев дают лишь частичное и не всегда оптимальное решение, в связи с чем возникает актуальный вопрос о поиске новых подходов. Современный этап развития физики Солнца открывает возможности сбора больших серий данных и постановки задачи напрямую на данных. Одновременно это является и вызовом для методов и технологий. Для раскрытия потенциала больших данных необходимо развитие новых принципов и методов работы с данными, среди которых особую актуальность сегодня приобретают методы машинного обучения. В ряде других областей эти методы уже достигли значимого прогресса, и наиболее заметными примерами являются модели естественного языка (большие языковые модели). При этом качественный скачок в точности и широте решаемых задач произошел в тот момент, когда удалось подобрать эффективное параметрическое описание объектов (на примере моделей естественного языка – векторного представления слов, в котором близость векторов отражает смысловую близость между словами). На его основе далее решаются конкретные прикладные задачи. Принимая во внимание то, как этот опыт сегодня успешно распространяется на другие области, представляет интерес исследовать методы машинного обучения в физике Солнца и сфокусироваться на ключевой задаче – поиске репрезентативной параметризации.

Отметим ряд направлений в физике Солнца, для которых актуальна задача параметрического описания:

- **Количественная оценка показателей эволюции магнитных полей.** При определенных условиях в случайной среде возникает процесс самовозбуждения магнитного поля, однако задача оценки скорости роста поля является трудной как для аналитических, так и для численных методов. Численное моделирование усредненных величин на основе ансамбля реализаций может осложняться явлением перемежаемости, при котором определяющий вклад в скорость роста дают экстремальные реализации, получение которых на практике маловероятно. Известные аналитические методы позволяют давать оценки лишь при существенных упрощениях, обычно не свойственных реальной задаче. Разработка новых аналитических методов оценки параметров роста магнитных полей необходима для как для изучения условий, более приближенных к Солнцу, так и для подкрепления результатов численного моделирования.

- **Калибровка динамо-моделей на основе наблюдательных данных.** Модели солнечного динамо служат численной лабораторией для проверки различных теорий и инструментом прогноза солнечной активности. Значимость получаемых результатов напрямую зависит от того, насколько хорошо модельное решение согласуется с наблюдательными данными, что в свою очередь является следствием тонкого подбора параметров модели. С привлечением методов машинного обучения открывается возможность более полной и точной автоматической калибровки параметров динамо-моделей под различные целевые функции. В частности, это позволяет проводить эффективную ассимиляцию наблюдательных данных, а также может быть использовано для решения проблемы замыкания в теории динамо средних полей непосредственно на основе наблюдательных данных.
- **Методы машинной обработки данных, воспроизводящие работу астрономов-экспертов.** Поток современных наблюдательных данных уже несопоставим с возможностями его ручной обработки. При этом стандартные автоматические процедуры по качеству уступают тому уровню, который стал эталонным на протяжении многолетней работы астрономов, возникает проблема неоднородности результатов. Для раскрытия потенциала современных наблюдательных данных, получения и анализа параметров солнечной активности в высоком временном разрешении и на основе однородных серий, необходимо построения моделей машинной обработки, распространяющих эталонные методики на большие ряды данных. Перспективным способом решения этой задачи является подход на основе машинного обучения.
- **Выявление взаимосвязей в больших объемах данных высокой размерности.** Стандартные статистические и графические методы являются удобным инструментом исследования данных, пока количество изучаемых параметров остается небольшим. С их помощью был получен ряд важнейших взаимосвязей в физике Солнца. Для дальнейшего исследования представляет интерес, во-первых, привлечение новых более тонких параметров солнечной активности, объединение наблюдений различной природы в единый набор, поиск и выявления новых взаимосвязей в расширенном наборе параметров. Для этого необходимо развитие новых методов, способных эффективно работать в пространствах высокой размерности и с выборками большого размера.
- **Создание многолетних рядов данных по солнечной активности.** Появление в открытом доступе отсканированных исторических

каталогов открывает возможности исследования параметров солнечной активности на больших временных масштабах. Благодаря этому уже удалось заполнить некоторые пробелы в сериях наблюдений, однако ввиду присущей историческим данным неопределенности и фрагментарности, необходимо изучение как можно большего числа источников. Для этого необходимо провести оцифровку: перенести информацию из каталогов в числовой вид. В ряде случаев объемы каталогов существенно превышают возможности ручной обработки – возникает задача автоматической оцифровки. Эффективным подходом оказываются методы машинного обучения. В отдельных случаях, когда детали проведения наблюдений неизвестны, требуется реконструкция методик. Несмотря на исключительную трудоемкость этой работы, это является единственным способом получить прямые сведения об особенностях солнечной активности в прошлом, на основе которых можно делать прогнозы относительно долгосрочных изменений в будущем.

Большинство моделей, предлагаемых в диссертационной работе, основаны на методах машинного обучения. Актуальность и перспективность этого направления обуславливается успехами подобных методов в других прикладных областях. Для развития методов машинного обучения в физике Солнца сегодня есть все подходящие условия. Во-первых, проведена большая работа по систематизации и публикации в открытом доступе больших серий наблюдательных данных, как современных, так и исторических. Во-вторых, путь развития моделей, пройденный в других прикладных областях, создает задел для адаптации этих методов к задачам физики Солнца. Наконец, необходимые вычислительные ресурсы и объемы хранилищ данных постепенно становятся доступными большому числу исследовательских групп. Совокупность этих факторов показывает, что заявленные в работе цели и методы отвечают актуальным задачам и возможностям современной науки.

Цели и задачи Диссертация посвящена развитию новых численных и аналитических методов параметрического описания процессов и явлений солнечной активности и изучению свойств полученных параметров в контексте солнечной физики. Основные цели диссертации:

- **Оценка параметров роста магнитного поля и его старших статистических моментов на начальной стадии динамо.** Вначале решается задача оценки скоростей роста на упрощенном модельном примере, предложенном Я.Б. Зельдовичем, и на ее основе – разработки общего метода, который переносится на задачу динамо. Ставится задача получения оценок скоростей роста магнитного поля для

изотропной и анизотропной среды и изучения влияния параметров анизотропии.

- **Оценка параметров динамо-моделей на основе наблюдательных данных.** Ставится задача разработки эффективного метода ассимиляции наблюдательных данных в моделях динамо на основе нейродифференциальных уравнений. На примере маломодовой модели и синтетических данных ставится задача изучения спектра параметров модели динамо, в первую очередь, функции подавления альфа-эффекта, при которых воспроизводятся целевые данные, и изучения влияния полноты входных данных на оценки параметров. На основе разработанного метода ставится задача подбора параметров динамо-модели, при которых модель воспроизводит средний профиль наблюдаемых циклов солнечной активности.
- **Разработка метода сегментации активных областей на изображениях солнечного диска, воспроизводящего результат работы экспертов-наблюдателей.** Вначале ставится задача анализа существующих методов сегментации, определения степени согласованности результатов и выработки критериев качества для методов обработки. На основе эталонного ряда карт, ставится задача разработки автоматического метода сегментации корональных дыр с помощью моделей машинного обучения, анализа физических свойств, особенностей распределения и развития корональных дыр.
- **Построение параметрического описания геометрической структуры групп солнечных пятен методами машинного обучения.** Ставится задача автоматического расширения базового набора физических параметров новыми параметрами, передающими тонкие детали строения группы, изучения физической интерпретации и возможности использования полученных параметров для решения прикладных задач.
- **Восстановление параметров солнечной активности из архивных наблюдений.** Ставится задача разработки автоматического метода оцифровки табличных каталогов Цюрихской обсерватории, восстановления координат солнечных пятен, факелов и протуберанцев, анализа особенностей солнечной активности в период столетнего минимума. Ставится задача реконструкции методик наблюдения и восстановления координат солнечных пятен из каталогов О. Флержера в период минимума Дальтона, поиска примеров долгоживущих пятен и уточнения границ солнечных циклов.

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.

Разработаны новые комплексы программ, представленные в открытом доступе в репозитории <https://github.com/observethesun/>:

- <https://github.com/observethesun/helio> – комплекс программ для чтения, обработки и записи в различных форматах наблюдений по солнечной активности;
- https://github.com/observethesun/coronal_holes – комплекс программ для обучения модели сегментации корональных дыр на диске Солнца;
- https://github.com/observethesun/synoptic_maps – комплекс программ для создания синоптических карт и выделения корональных дыр;

- https://github.com/observethesun/sunspot_groups – комплекс программ для обучения модели параметризации формы групп солнечных пятен;
- <https://github.com/observethesun/dynamoNDE> – комплекс программ для создания и обучения нейродифференциальных моделей динамо;
- <https://github.com/observethesun/halpha> – комплекс программ для создания и обучения моделей по оцифровке даты и времени снимков из архива обсерватории Сакраменто-Пик.

Созданы и представлены в открытом доступе новые базы данных:

- сайт <https://observethesun.ru/>, представляющий карты активных областей, индексы и прогноз солнечной активности;
- Каталог синоптических карт и карт корональных дыр https://sun.njit.edu/coronal_holes;
- Каталог карт КД и карт магнитных полей КД <https://sun.njit.edu/monitor>;
- Каталог координат пятен, факелов и протуберанцев по наблюдениям Цюрихской обсерватории https://github.com/observethesun/zurich_catalogs;
- Каталог координат пятен по наблюдениям О. Флержера <https://github.com/observethesun/Flaugergues>;
- Каталог параметров групп солнечных пятен Кисловодской обсерватории https://github.com/observethesun/sunspot_groups;
- Набор из 100 тысяч аннотированных примеров рукописных чисел из архивных каталогов https://github.com/observethesun/handwritten_numbers;
- Каталог оцифрованных значений дат и времени снимков из архива обсерватории Сакраменто-Пик <https://doi.org/10.5281/zenodo.18392561>.

Теоретическая и практическая значимость работы Разработанные методы параметрического описания процессов и явлений солнечной активности могут служить основой для детального изучения солнечной активности и построения более точных моделей прогноза.

Предложенные методы аналитической оценки скоростей роста векторных полей в случайных средах позволяют изучать и сопоставлять эффективность различных механизмов, приводящих к росту, получать оценки для магнитного поля и магнитной энергии на начальной стадии динамо и влияния параметров распределения поля скоростей. Полученные аналитические оценки подтверждают результаты, получаемые численным моделированием и усреднением по ансамблю реализаций.

Предложенный подход по ассимиляции наблюдательных данных в моделях солнечного динамо с помощью нейродифференциальных уравнений открывает возможности решения проблемы замыкания в теории средних полей и ведет к построению более точных моделей прогноза солнечной активности. Важным результатом для дальнейшего теоретического исследования является демонстрация существенной вариативности параметров моделей динамо, обеспечивающих близкое согласие с наблюдательными данными.

В работе показано, что методы анализа наблюдательных данных, основанные на машинном обучении, обеспечивают высокую точность при обработке изображений солнечного диска и сегментации контуров корональных дыр. Эти методы могут быть использованы при создании систем непрерывного мониторинга солнечной активности. Продемонстрированная высокая корреляция между параметрами корональных дыр и долговременными вариациями солнечного ветра может быть основой для уточнения моделей прогноза космической погоды.

Предложенные модели параметризации геометрической структуры групп солнечных пятен могут быть основой для изучения стадий развития групп солнечных пятен, разработки более точных методов автоматической классификации групп пятен и прогноза солнечных вспышек.

Выполненная реконструкция архивных данных позволяет дополнить и детализировать картину солнечной активности в историческом периоде, создать ряды для изучения солнечной активности на больших временных масштабах. Показано, что разработанные методы оцифровки архивных данных, основанные на машинном обучении, адаптируются к задачам оцифровки других каталогов и позволяют расширить наблюдательную базу для дальнейших исследований.

Опубликованные исходные коды разработанных моделей и комплексов программ являются основой для проведения дальнейших исследований, интеграции в другие системы и адаптации под новые задачи.

Апробация работы и публикации Результаты диссертации опубликованы в 25 статьях в изданиях, входящих в перечень ВАК:

- 1) Е. А. Илларионов. Методы машинного обучения в физике Солнца // Успехи физических наук. 2025. Т. 195, № 4, с. 395–415. DOI: 10.3367/ufnr.2025.02.039872.

- 2) E. Illarionov, V. Kisielius, R. Stepanov, K.M. Kuzanyan. Neural differential equations for the solar dynamo // *Physical Review E*. 2026. V. 113, issue, article L053202. DOI: 10.1103/dpsp-bwkh.
- 3) E. Illarionov, A. Tlatov, I. Berezin, N. Skorbezh. Correlation of coronal hole area indices and solar wind speed // *Solar Physics*, 2025. V. 300, issue 9, article 123. DOI: 10.1007/s11207-025-02530-z.
- 4) E. A. Illarionov, D. D. Sokoloff. Relative efficiency of three mechanisms of vector fields growth in a random media // *Physical Review E*. 2023. V. 107, issue 4, article 044110. DOI: 10.1103/PhysRevE.107.044110.
- 5) E. Illarionov, R. Arlt. Sunspot positions from observations by Flaugergues in the Dalton minimum // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2023. V. 523, N. 2, p. 1809–1821. DOI: 10.1093/mnras/stad1489.
- 6) E. Illarionov, R. Arlt. Reconstruction of the solar activity from the catalogs of the Zurich observatory // *Solar Physics*. 2022. V. 297, issue 7, article 79. DOI: 10.1007/s11207-022-02015-3.
- 7) E. Illarionov, A. Tlatov. Parametrization of sunspot groups based on machine learning approach // *Solar Physics*. 2022. V. 297, issue 2, article 19. DOI: 10.1007/s11207-022-01955-0.
- 8) E. A. Illarionov, D. D. Sokoloff. Finite memory time and anisotropy effects for initial magnetic energy growth in random flow of conducting media // *Physical Review E*. 2021. V. 104, issue 1, article 015214. DOI: 10.1103/PhysRevE.104.015214.
- 9) E. Illarionov, A. Kosovichev, A. Tlatov. Machine-learning approach to identification of coronal holes in solar disk images and synoptic maps // *Astrophysical Journal*. 2020. V. 903, N. 2, article 115. DOI: 10.3847/1538-4357/abb94d.
- 10) E. A. Illarionov, A. G. Tlatov. Segmentation of coronal holes in solar disk images with a convolutional neural network // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018. V. 481, N. 4, p. 5014–5021. DOI: 10.1093/mnras/sty2628.
- 11) E. A. Illarionov, D. D. Sokoloff. Growth rate of the initial magnetic energy in isotropic velocity field with non-Gaussian distribution // *Magnetohydrodynamics*. 2023. V. 51, N. 1, p. 23–27. DOI: 10.22364/mhd.59.1.2.

- 12) Е. А. Илларионов, Д. Д. Соколов, С. С. Павленко. Флуктуации времени памяти и взрывной рост моментов в системах уравнений со случайными коэффициентами // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2026. Т. 66, № 1, с. 19–23. DOI: 10.7868/S3034533226010025.
- 13) V. Kisielius, E. Illarionov. Machine learning for reconstruction of polarity inversion lines from solar filaments // Solar Physics. 2024. V. 299, issue 5, article 69. DOI: 10.1007/s11207-024-02324-9.
- 14) M. A. Reiss, K. Muglach, C. Mostl, C. N. Arge, R. Bailey, V. Delouille, T. M. Garton, A. Hamada, S. Hofmeister, E. Illarionov, R. Jarolim, M. S. Kirk, A. Kosovichev, L. Krista, S. Lee, C. Lowder, P. J. MacNeice, A. Veronig. The observational uncertainty of coronal hole boundaries in automated detection schemes // Astrophysical Journal. 2021. V. 913, N. 1, article 28. DOI: 10.3847/1538-4357/abf2c8.
- 15) M. A. Reiss, K. Muglach, E. Mason, E. E. Davies, S. Chakraborty, V. Delouille, C. Downs, T. M. Garton, J. A. Grajeda, A. Hamada, S. G. Heinemann, S. Hofmeister, E. Illarionov, R. Jarolim, L. Krista, C. Lowder, E. Verwichte, C. N. Arge, L. E. Boucheron, C. Foullon, M. S. Kirk, A. Kosovichev, A. Leisner, C. Mostl, J. Turtle, A. Veronig. A community data set for comparing automated coronal hole detection schemes // Astrophysical Journal, Supplement Series. 2024. V. 271, N. 1, article 6. DOI: 10.3847/1538-4365/ad1408.
- 16) A. Aatiya, V. Sadykov, A. Kosovichev, I. N. Kitiashvili, V. Oria, G. M. Nita, E. Illarionov, P. M. O’Keefe, F. Francis, C.-J. Chong, P. Kosovich, R. D. Marroquin. Predicting solar proton events of solar cycles 22–24 using goes proton and soft-x-ray flux features // Astrophysical Journal, Supplement Series. 2024. V. 270, N. 1, article 15. DOI: 10.3847/1538-4365/ad0a6c.
- 17) R. D. Marroquin, V. Sadykov, A. Kosovichev, I. N. Kitiashvili, V. Oria, G. M. Nita, E. Illarionov, P. M. O’Keefe, F. Francis, C. J. Chong, P. Kosovich, A. Ali. Statistical study of the correlation between solar energetic particles and properties of active regions // Astrophysical Journal. 2023. V. 952, N. 2, article 97. DOI: 10.3847/1538-4357/acdb65.
- 18) Д. Д. Соколов, А. А. Чикина, Е. А. Илларионов. Средний квадрат геодезического отклонения в задаче Зельдовича о распространении света во Вселенной с неоднородностями. Астрономический журнал. 2021. Т. 98, № 5, с. 355–362. DOI: 10.31857/S0004629921050078.

- 19) S. Pavlenko, E. Illarionov, D. Sokoloff. Memory time fluctuations and instabilities in random media // Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics. 2025. V. 119, N. 3-4, p. 382–388. DOI: 10.1080/03091929.2025.2455175.
- 20) В. Киселюс, Е.А. Илларионов, Р.А. Степанов, К.М. Кузанын. Сопоставление одношагового и многошагового подхода к прогнозированию индекса солнечной активности // Известия РАН. Серия физическая. 2025. Т. 89, № 7, с. 1143–1148. DOI: 10.7868/S3034646025070218.
- 21) А. П. Очир-Горяева, Д. Д. Соколов, Е. А. Илларионов. Эффекты длинной памяти при развитии неустойчивости в случайной среде // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2025. Т. 166, № 6, с. 878–887. DOI: 10.31857/S0044451024120113.
- 22) K. Whitman, R. Egeland, I. G. Richardson, C. Allison, P. Quinn, J. Barzilla, I. Kitiashvili, V. Sadykov, H. M. Bain, M. Dierckxsens, M. L. Mays, T. Tadesse, K. T. Lee, E. Semones, J. G. L., M. Núñez, S. M. White, S. W. Kahler, A. G. Ling, D. F. Smart, M. A. Shea, V. Tenishev, S. F. Boubrahimi, B. Aydin, P. Martens, R. Angryk, M. S. Marsh, S. Dalla, N. Crosby, N. A. Schwadron, K. Kozarev, M. Gorby, M. A. Young, M. Laurenza, E. W. Cliver, T. Alberti, M. Stumpo, S. Benella, A. Papaioannou, A. Anastasiadis, I. Sandberg, M. K. Georgoulis, A. Ji, D. Kempton, C. Pandey, L. Gang, J. Hu, G. P. Zank, E. Lavasa, G. Giannopoulos, D. Falconer, Y. Kadadi, I. Fernandes, M. A. Dayeh, A. Muñoz-Jaramillo, S. Chatterjee, K. D. Moreland, I. V. Sokolov, I. I. Roussev, A. Taktakishvili, F. Effenberger, T. Gombosi, Z. Huang, L. Zhao, N. Wijsen, A. Aran, S. Poedts, A. Kouloumvakos, M. Paassilta, R. Vainio, A. Belov, E. A. Eroshenko, M. A. Abunina, A. A. Abunin, C. C. Balch, O. Malandraki, M. Karavolos, B. Heber, J. Labrenz, P. Köhl, A. G. Kosovichev, V. Oria, G. M. Nita, E. Illarionov, P. M. O’Keefe, Y. Jiang, S. H. Ferreira, A. Ali, E. Paouris, S. Amini, P. Jiggins, M. Jin, C. O. Lee, E. Palmerio, A. Bruno, S. Kasapis, X. Wang, Y. Chen, B. Sanahuja, D. Lario, C. Jacobs, D. Toit Strauss, R. Steyn, B. Jabus van den, B. Swalwell, C. Waterfall, M. Nedal, R. Miteva, M. Dechev, P. Zucca, A. Engell, B. Maze, H. Farmer, T. Kerber, B. Barnett, J. Loomis, N. Grey, B. J. Thompson, J. A. Linker, R. M. Caplan, C. Downs, T. Török, R. Lionello, V. Titov, M. Zhang, and P. Hosseinzadeh. Review of solar energetic particle models // Advances in Space Research. 2022. V. 72, N. 12, p. 5161–5242. DOI: 10.1016/j.asr.2022.08.006.
- 23) V. M. Sadykov, I. N. Kitiashvili, A. S. Dalda, V. Oria, A. G. Kosovichev, E. A. Illarionov. Compression of Solar Spectroscopic Observations: a

Case Study of Mg II k Spectral Line Profiles Observed by NASA's IRIS Satellite // Труды конференции International Conference on Content-Based Multimedia Indexing. IEEE, 2021. P. 106–111. DOI: 10.1109/cbmi50038.2021.9461879.

- 24) О. А. Андреева, Е.А. Илларионов. Вариации некоторых индексов солнечной активности и магнитные поля корональных дыр 25-го цикла // Геомагнетизм и аэрономия. 2025. Т. 65, № 5, с. 590–598. DOI: 10.7868/S3034502225050035.
- 25) А. Г. Тлатов, Е. А. Илларионов, И. А. Березин, А. Д. Шрамко. Прогнозирование солнечных вспышек и фоновых потоков рентгеновского излучения по данным синоптических наземных наблюдений с помощью методов машинного обучения // Космические исследования. 2020. Т. 58, № 6, с. 479–484. DOI: 10.31857/S0023420620060102.

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

- Физика плазмы в Солнечной системе, ИКИ РАН, 2026, 2025, 2024, 2023, 2022, 2021, 2019, 2018
- Солнечная и солнечно-земная физика, ГАО РАН, 2025 (ИЗМИРАН), 2024, 2023, 2022, 2021, 2020, 2019, 2018
- Machine Learning and Computer Vision in Heliophysics, Sofia, Bulgaria, 2025
- The Fifth Russian Conference on Magnetohydrodynamics, Пермь, 2024
- Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2024, САО РАН, 2024
- Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, 2023, 2021
- IAU Symposium 365, Ереван, Армения, 2023
- Machine Learning in Heliophysics, Boulder, United States, 2022
- 15th Quadrennial Solar-Terrestrial Physics Symposium, India, 2022
- Успехи российской астрофизики, 2021, 2018
- IV Russian Conference on Magneto Hydrodynamics, Пермь, 2021
- Applications of Statistical Methods and Machine Learning in the Space Sciences, United States, 2021

- P.L. Chebyshev-200, Москва, 2021
- Heliophysics 2050, United States, 2021
- Space Weather Workshop, United States, 2021
- Ломоносовские чтения 2021, Москва, 2021
- Machine Learning in Heliophysics, Амстердам, 2019
- Data Science Summer School, Париж, 2019
- Всероссийская астрономическая конференция – 2017 «Астрономия: познание без границ», Ялта, 2017

Отдельные результаты стали темой публикаций в СМИ, например. <https://academia.interfax.ru/ru/news/articles/5877>, <https://nauka.tass.ru/nauka/10332743>, <https://nauka.tass.ru/nauka/15119033>.

В процессе работы над диссертацией под руководством автора был получен и успешно выполнен грант РФФ № 20-72-00106. Работа над диссертацией была частично поддержана грантами РФФ № 23-22-00165, 21-72-20067, грантами РФФИ и рядом НИР на базе МГУ и Московского центра фундаментальной и прикладной математики.

Работы автора были отмечены победами в конкурсе работ, способствующих решению задач Программы развития Московского университета в номинации «Выдающиеся научные статьи».

Опыт, полученный автором в результате работы над задачами диссертации, использован при разработке и чтении лекций на механико-математическом факультете МГУ по направлениям «Методы анализа данных», «Математическая статистика и анализ данных», «Программирование», а также при проведении семинарских занятий и практикумов по основам машинного обучения, теории вероятностей, статистике и случайным процессам.

Основные положения, выносимые на защиту

- 1) Для исследования начальной стадии динамо в конвективной зоне Солнца разработан аналитический метод оценки скоростей роста статистических моментов векторных полей на основе моделей случайной среды с конечным временем памяти. Получены оценки скоростей роста магнитного поля и магнитной энергии в изотропной и осесимметричной анизотропной среде. Оценены пороговые значения числа Струхалия для применимости аналитических методов и показано согласие этих методов с результатами численного моделирования. Показано, что в пределе малого времени памяти эти оценки согласуются

с оценками в приближении коротких временных корреляций. Исследованы механизмы роста статистических моментов векторных полей, основанные на сочетании резонансных эффектов и эффектов перемешиваемости и получены оценки относительного вклада этих эффектов.

- 2) На основе разработанных нейродифференциальных уравнений для маломодовых моделей солнечного динамо получены оценки для динамо-числа и функции подавления альфа-эффекта (*alpha-quenching*), позволяющие воспроизвести средний профиль солнечного цикла, построенного на основе многолетнего индекса солнечных пятен. Показано, что существует широкий спектр значений для динамо-числа и профилей функции подавления, дающих согласие с наблюдательными данными, и описана зависимость между этими параметрами. На основе синтетических данных показано, что вариативность восстанавливаемых параметров динамо-модели снижается при использовании более полного набора данных о магнитном поле и при этом повышается точность оценки параметров. Полученные результаты демонстрируют возможность использования нейродифференциальных моделей для адаптации динамо-моделей под наблюдательные данные.
- 3) Предложен метод анализа корональных дыр (КД), основанный на машинном обучении с применением нейронных сетей, позволяющий преодолеть ограничения алгоритмов, базирующихся на явных правилах, неполно учитывающих вариативность среды. Созданы каталоги границ и параметров КД. Найдены параметры КД, обладающие высокой корреляцией со скоростью солнечного ветра, и показано, что эта корреляция заметно выше, чем у ранее предлагавшихся алгоритмов выделения КД. Показано, что основной вклад в долговременные вариации солнечного ветра создают низкоширотные КД. Доказано существование асимметрии в стадиях развития и амплитудах КД между северным и южным полушариями. На основе построенных широтно-временных диаграмм фотосферного магнитного поля и магнитного поля в КД показано, что помимо переноса магнитного потока с низких широт, должны существовать и другие механизмы формирования полярных КД.
- 4) Предложен, основанный на машинном обучении на многолетних рядах изображений групп солнечных пятен, подход для создания полного, но компактного описания групп солнечных пятен. Разработанные модели позволяют получить компактный набор параметров, однозначно описывающих детальную геометрическую структуру групп солнечных пятен и позволяющий проводить количественное сравне-

ние групп между собой. Показано, что среди новых параметров сохраняются параметры, тесно связанные со стандартными физическими свойствами групп: угол наклона, площадь, протяженность, а также то, что на их основе воспроизводятся основные наблюдательные закономерности включая асимметрию между северным и южным полушарием. Показано, что точность восстановления исходного образа группы зависит от числа параметров, описывающих группу. Предложен метод количественной оценки сложности геометрической структуры группы, согласующийся с известными стадиями ее развития. Сравнение оценок с классами групп солнечных пятен по Цюрихской системе продемонстрировало его достаточно высокую точность.

- 5) На основе разработанных моделей машинного обучения выполнена оцифровка многолетних рукописных каталогов Цюрихской обсерватории и восстановлены координаты солнечных пятен, факелов и протуберанцев в конце 19 – начале 20 веков. Полученные координаты солнечных пятен детализируют и дополняют информацию о положении и строении групп пятен из каталогов Гринвичской обсерватории и позволяют сделать вывод о согласии в методиках идентификации пятен в этих двух обсерваториях. Построенные широтно-временные диаграммы показывают новые особенности солнечной активности в период столетнего солнечного минимума в начале 20 века: асимметрию в фазах миграции факелов к полюсам в северном и южном полушариях, высокую корреляцию числа протуберанцев и солнечных пятен в 13 и 14 цикле и их аномально низкое соотношение в цикле 15.
- 6) Разработаны методы обработки и интерпретации исторических данных, являющихся единственным прямым свидетельством о долгосрочных вариациях солнечной активности. На основе каталогов солнечных пятен О. Флержера (18–19 века), и реконструкции его методик транзитных наблюдений восстановлены координаты 527 положений солнечных пятен для 154 дней наблюдений в период особого режима солнечной активности, известного как минимум Дальтона. Показано, что используемая методика дает высокую точность измерения координат объектов на диске Солнца. Получены широтно-временные диаграммы распределения солнечных пятен, дополняющие и связующие между собой более краткосрочные наблюдения других астрономов, что позволяет уточнить характер солнечной цикличности в период минимума Дальтона. Показано, что в этот период существовали долгоживущие группы пятен, наблюдаемые более одного солнечного оборота, имелась асимметрия пятенной активности между северным и южным полушарием. Получены новые свидетельства аномальной длительности цикла 4. Возможно и существование короткого (пете-

рянного) цикла между 4-ым и 5-ым. Отсутствие измерений в 1793–94 годах не позволяет сделать окончательный выбор между этими двумя возможностями.

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

Основное содержание работы

Во **введении** представлена общая характеристика работы, цели работы, обосновывается актуальность, перечисляются основные результаты, выносимые на защиту. Отмечается научная новизна полученных результатов, приводится перечень новых комплексов программ и баз данных. Приводится список статей автора по теме диссертации и конференций, на которых были представлены результаты. Кратко излагается содержание работы.

Глава 1 посвящена обзору существующих подходов. Приводятся примеры источников данных, обсуждаются методы обработки данных, преимущества и недостатки различных моделей, отмечаются открытые проблемы. Проводится сопоставление с методами и моделями, разработанными в смежных областях науки. Обозначаются направления дальнейшего исследования: описание процессов, связанных с развитием неустойчивостей в случайных средах; ассимиляция наблюдательных данных в моделях солнечного динамо; анализ и параметрическое описание активных областей на Солнце на основе больших серий современных наблюдательных данных; восстановление параметров солнечной активности по историческим каталогам наблюдений.

Глава 2 посвящена выводу аналитических и численных оценок скорости роста векторных полей и их статистических моментов в случайных средах.

В **разделе 2.1** дается описание модельного примера, с которого начинается исследование – уравнение Якоби со случайным параметром кривизны. Это уравнение имеет вид

$$y'' + K(x)y = 0. \quad (1)$$

Предполагается, что $K(x)$ – случайный процесс, постоянный на интервалах $\Delta_n = [n\Delta, (n+1)\Delta)$, называемых интервалами обновления. Параметр Δ интерпретируется как время памяти, а постоянные значения $K(x) = K_n$ на этих интервалах являются независимыми случайными величинами с одинаковым распределением.

Средняя скорость роста поля Якоби определяется с помощью показателя Ляпунова

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n\Delta} \langle \ln |y(n\Delta)| \rangle. \quad (2)$$

Скорость роста статистического момента порядка p поля Якоби задается величиной

$$\gamma_p = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2pn\Delta} \ln \langle |y(n\Delta)|^p \rangle. \quad (3)$$

Вводя вспомогательные переменные $z_1 = y$, $z_2 = y'\Delta$, уравнение Якоби сводится к системе уравнений первого порядка

$$\frac{d}{dx} (z_1, z_2) = (z_1, z_2) \begin{pmatrix} 0 & -K\Delta \\ 1/\Delta & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

которая в матричной форме принимает вид

$$\mathbf{z}' = \mathbf{z}B. \quad (5)$$

Решение этой системы выражается через произведение матричных экспонент

$$\mathbf{z}(n\Delta) = \mathbf{z}_0 \exp(B_1\Delta) \exp(B_2\Delta) \dots \exp(B_n\Delta), \quad (6)$$

где B_i – реализация случайной матрицы B на i -ом интервале обновления. Явный вид матричной экспоненты $\hat{B} = \exp(B\Delta)$ записывается как

$$\hat{B} = \begin{pmatrix} \cos \sqrt{k} & -\sqrt{k} \sin \sqrt{k} \\ \frac{\sin \sqrt{k}}{\sqrt{k}} & \cos \sqrt{k} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $k = K\Delta^2$.

Таким образом, вопрос об изучении статистических свойств решения уравнения Якоби сводится к изучению статистических свойств произведения случайных матриц.

В **разделе 2.2** приводится описание метода расчета показателя Ляпунова на основе понятия инвариантной меры и скоростей роста моментов поля Якоби.

Следуя математической теории, произведение матричных экспонент для изучаемой модели порождает эргодическую марковскую цепь, и вычисление показателя Ляпунова сводится к нахождению стационарного распределения (инвариантной меры) для этой цепи. В общем случае, эта задача решается численно и имеет ряд трудностей. На рисунке [1](#) представлены численные результаты для стационарного распределения для случаев, когда параметр кривизны является случайным знакопостоянным и случайным знакопеременным.

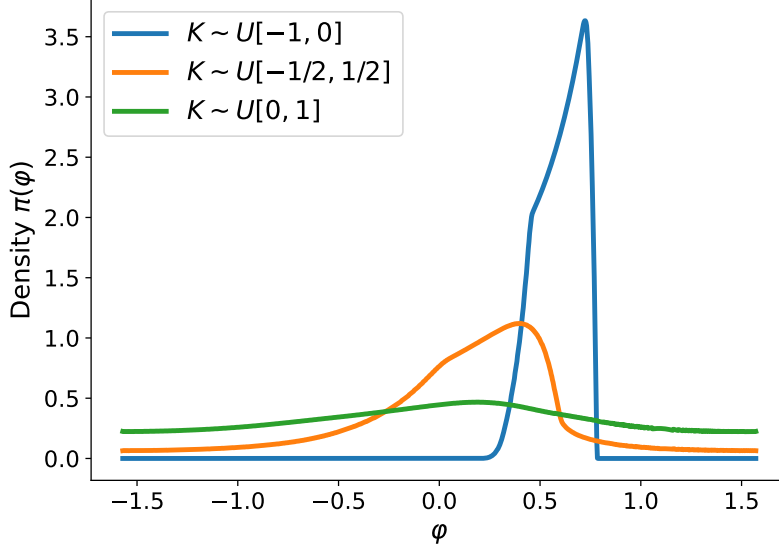


Рис. 1: Стационарное распределение для различных распределений K . Рисунок из работы 4 из списка публикаций.

K	λ
$U[-1, 0]$	0.693
$U[-1/2, 1/2]$	0.133
$U[0, 1]$	0.018

Таблица 1: Показатели Ляпунова поля Якоби для различных распределений K .

В таблице 1 приведены соответствующие показатели Ляпунова. Во всех случаях обнаруживается положительная скорость роста поля Якоби. Для положительных K рост связывается с резонансом осциллирующих решений, тогда как для отрицательных и знакопеременных K рост формируется за счет интервалов, где K отрицательно. При этом скорость роста, обусловленная резонансом, оказывается на порядок слабее по сравнению с другими сценариями.

Скорость роста γ среднего поля $\langle \mathbf{z} \rangle$ связывается со старшим собственным значением $\lambda_{(1)}$ матричной экспоненты $\langle \hat{B} \rangle$. Для малых Δ матрица $\langle \hat{B} \rangle$, $\lambda_{(1)}$ и γ могут быть аппроксимированы в терминах нескольких первых статистических моментов случайной величины K , а именно, в терминах $\mu = \langle K \rangle$ и $\sigma^2 = \text{var} K$. Получено, что в случае отрицательных K

$$\gamma = \frac{1}{2}\sqrt{-\mu} + \frac{1}{24}\frac{\sigma^2}{\sqrt{-\mu}}\Delta^2 + O(\Delta^3). \quad (8)$$

Для симметрично-распределенного K аппроксимация имеет вид

$$\gamma = \frac{\sqrt{6}}{12}\sigma\Delta + O(\Delta^3) \quad (9)$$

и $\gamma \rightarrow 0$ при $\Delta \rightarrow 0$. Для положительного K аппроксимация имеет вид

$$\gamma = -\frac{1}{48}\sigma^2\Delta^3 + O(\Delta^4). \quad (10)$$

На рисунке 2 показано согласие найденных аналитических приближений γ с численными оценками этой величины в случае малых Δ .

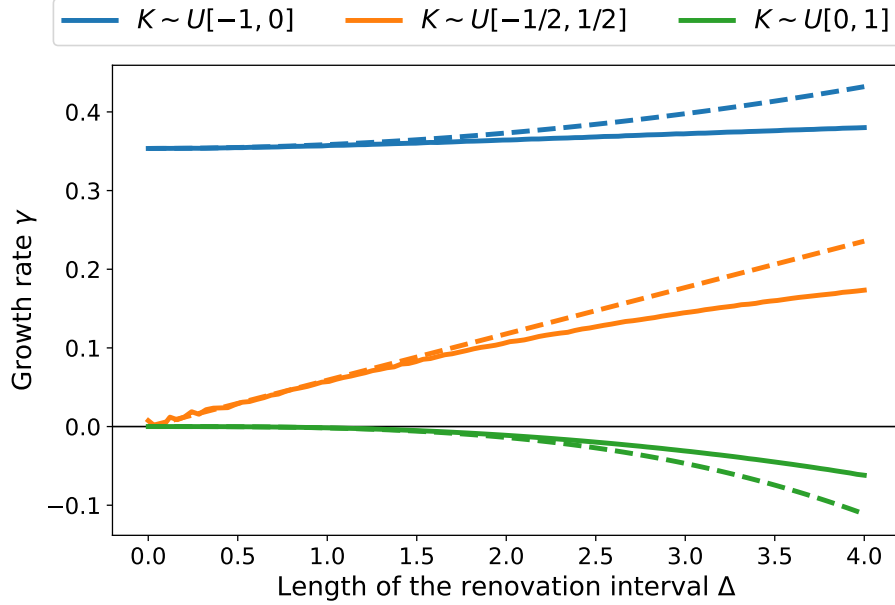


Рис. 2: Скорость роста γ среднего поля Якоби для различных распределений K . Сплошные линии показывают численные оценки, пунктирные – аналитические приближения. Рисунок из работы 4 из списка публикаций.

Скорость роста γ_2 для второго момента поля Якоби связывается со скоростью роста произведения матриц при рассмотрении расширенной системы уравнений для попарных произведений компонент вектора $\mathbf{z}$. Возникает произведение случайных матриц вида

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} \cos^2 \sqrt{k} & \frac{\sin 2\sqrt{k}}{2\sqrt{k}} & \frac{\sin 2\sqrt{k}}{2\sqrt{k}} & \frac{\sin^2 \sqrt{k}}{k} \\ \frac{-\sqrt{k} \sin 2\sqrt{k}}{2} & \cos^2 \sqrt{k} & -\sin^2 \sqrt{k} & \frac{\sin 2\sqrt{k}}{2\sqrt{k}} \\ \frac{-\sqrt{k} \sin 2\sqrt{k}}{2} & -\sin^2 \sqrt{k} & \cos^2 \sqrt{k} & \frac{\sin 2\sqrt{k}}{2\sqrt{k}} \\ k \sin^2 \sqrt{k} & \frac{-\sqrt{k} \sin 2\sqrt{k}}{2} & \frac{-\sqrt{k} \sin 2\sqrt{k}}{2} & \cos^2 \sqrt{k} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

При малых Δ получены аналитические оценки величины γ_2 . А именно, для K , распределенных в отрицательной области, скорость роста имеет вид

$$\gamma_2 = \frac{1}{2}\sqrt{-\mu} - \frac{1}{16}\frac{\sigma^2}{\mu}\Delta + O(\Delta^2). \quad (12)$$

Для симметрично-распределенного K скорость роста имеет вид

$$\gamma_2 = \frac{1}{4}(2\sigma^2)^{\frac{1}{3}}\Delta^{\frac{1}{3}} + O(\Delta). \quad (13)$$

Для K , распределенного в положительной области, скорость роста имеет вид

$$\gamma_2 = \frac{1}{8} \frac{\sigma^2}{\mu} \Delta + O(\Delta^2). \quad (14)$$

На рисунке 3 показано согласие полученных оценки величины γ_2 с результатами численного моделирования.

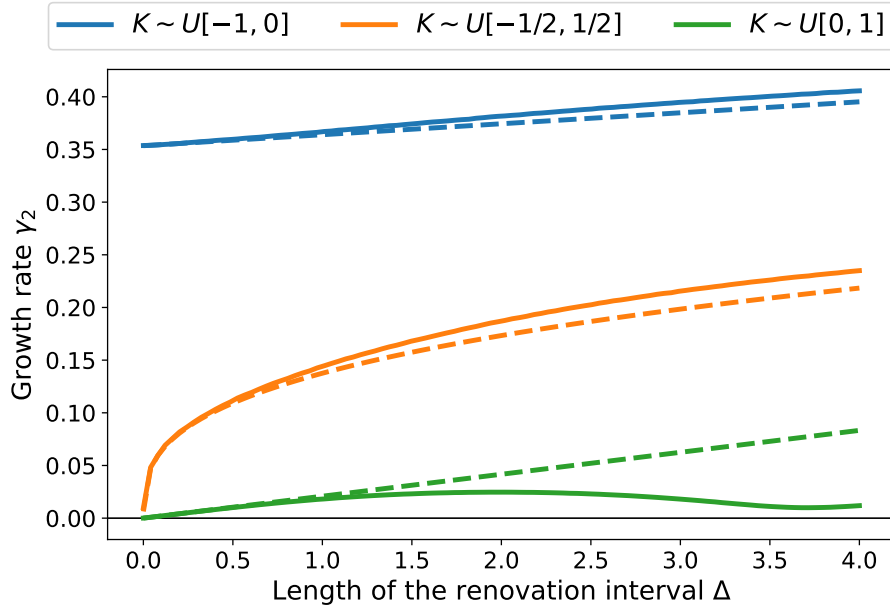


Рис. 3: Скорость роста γ_2 для различных распределений K . Сплошные линии показывают численные оценки, пунктирные линии показывают аналитические результаты. Рисунок из работы 4 из списка публикаций.

В **разделе 2.3** формулируется общий метод оценки скоростей роста статистических моментов векторного поля в рамках модели с обновлениями. Обсуждается вывод оценок в гауссовском случае.

В **разделе 2.4** рассматривается изотропная модель магнитного поля в случайной среде, решается задача о нахождении скорости роста второго момента (магнитной энергии), проводится сопоставление с численным моделированием.

Уравнение индукции для магнитного поля

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{H} = (\mathbf{H} \nabla) \mathbf{v} + \eta \Delta \mathbf{H} \quad (15)$$

при отсутствии диффузии и в лагранжевой системе приводится к форме

$$\frac{d\mathbf{H}}{dt} = A\mathbf{H}, \quad (16)$$

где A – матрица производных поля скорости, т.е. $A_{ij} = \partial v_i / \partial x_j$.

Статистически однородное и изотропное поле скоростей R_{ij} определяется корреляционным тензором вида

$$R_{ij}(\mathbf{r}) = f(r)\delta_{ij} + \frac{r}{2}f'(r)\left(\delta_{ij} - \frac{r_i r_j}{r^2}\right) + \gamma(r)\varepsilon_{ijk}r_k, \quad (17)$$

где $\mathbf{r} = \mathbf{x} - \mathbf{y}$, $r = \|\mathbf{r}\|$ и f – продольная корреляционная функция, которая полагается равной $f(r) = (v^2/3)\exp(-3r^2/5l^2)$.

Далее проводится вычисление корреляционного тензора для производных поля скорости $\partial v_i / \partial x_j$ и показывается, что функция $\gamma(r)$ не влияет на его вид.

В предположении, что матрицы $\hat{A}$ имеют гауссовское распределение, получаются оценки (с точностью до размерного множителя v/l) для скорости роста магнитной энергии в терминах числа Струхала $s = \tau v/l$:

$$\gamma_2 = \frac{1}{2}s - \frac{11}{40}s^3 + \frac{1747}{6000}s^5 + O(s^7). \quad (18)$$

На рисунке 4 показано согласие при малых s ($s < 0.6$) полученной аналитической оценки с результатом численного моделирования.

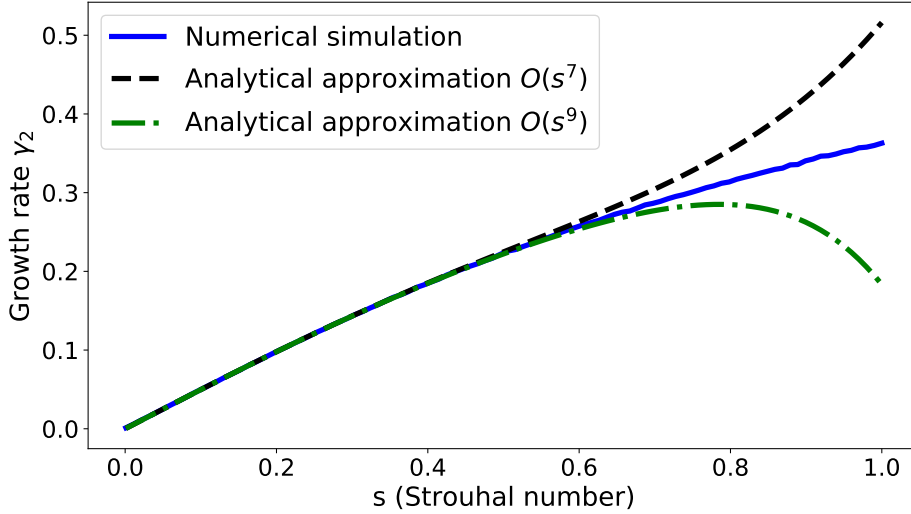


Рис. 4: Численная и аналитическая аппроксимация γ_2 для малых чисел Струхала в трехмерной изотропной модели случайного потока. Рисунок из работы 8 из списка публикаций.

В двумерной задаче, соответствующая оценка принимает вид

$$\gamma_2 = \frac{1}{4\tau} \ln \lambda = \frac{1}{2}s - \frac{1}{3}s^3 + \frac{4}{9}s^5 + O(s^7) \quad (19)$$

и также находится в согласии с результатами численного моделирования.

В разделе 2.5 рассматривается анизотропная (осесимметричная) модель случайной среды. Решается задача о нахождении скорости роста второго момента (магнитной энергии), проводится сопоставление с численным моделированием и изотропным случаем.

Осесимметричная модель определяется корреляционным тензором вида

$$R_{ij} = \varepsilon_{jkm} \frac{\partial q_{im}}{\partial r_k}, \quad (20)$$

где q_{im} имеет вид

$$q_{im} = r_k (\varepsilon_{imk} Q_1 + \varepsilon_{i1k} (\delta_{1m} Q_2 + r_m Q_3)). \quad (21)$$

В силу симметрии и нулевой дивергенции корреляционного тензора, функции Q_i связаны соотношением

$$Q_3 = \left(\frac{\partial}{\partial r_1} - \frac{r_1}{r_3} \frac{\partial}{\partial r_3} \right) Q_1. \quad (22)$$

Для определенности рассматривается модель, в которой

$$\begin{aligned} Q_1 &= -\frac{1}{2} v_1^2 \exp \left[-\frac{3}{5} \left(\frac{r_1^2}{l_1^2} + \frac{r_2^2 + r_3^2}{l_2^2} \right) \right], \\ Q_2 &= -(v_2^2 - v_1^2) \exp \left[-\frac{3}{5} \left(\frac{r_1^2}{l_1^2} + \frac{r_2^2 + r_3^2}{l_2^2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

Здесь v_1 и l_1 – средняя скорость и масштаб длины вдоль оси симметрии, v_2 и l_2 – соответствующие величины в ортогональной плоскости. Вводя параметры анизотропии $u = v_2^2/v_1^2$ и $L = l_2^2/l_1^2$, выражения принимают вид

$$\begin{aligned} Q_1 &= -\frac{1}{2} v_1^2 \exp \left[-\frac{3}{5l_1^2} \left(r_1^2 + \frac{r_2^2 + r_3^2}{L} \right) \right], \\ Q_2 &= (1 - u) v_1^2 \exp \left[-\frac{3}{5l_1^2} \left(r_1^2 + \frac{r_2^2 + r_3^2}{L} \right) \right]. \end{aligned} \quad (24)$$

Заметим, что $u = L = 1$ приводит к изотропной модели.

Далее делается вывод корреляционной матрицы для $\partial v_i / \partial x_j$ и выводится оценка для скорости роста магнитной энергии:

$$\gamma_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2\varepsilon}{3} \right) s - \frac{11}{40} \left(1 + \frac{4\varepsilon}{3} \right) s^3 + \frac{1747}{6000} (1 + 2\varepsilon) s^5. \quad (25)$$

На рисунке 5 показано согласие при малых s ($s < 0.6$) получаемых оценок с результатами численного моделирования при различных значениях параметров u и L , характеризующих анизотропию модели.

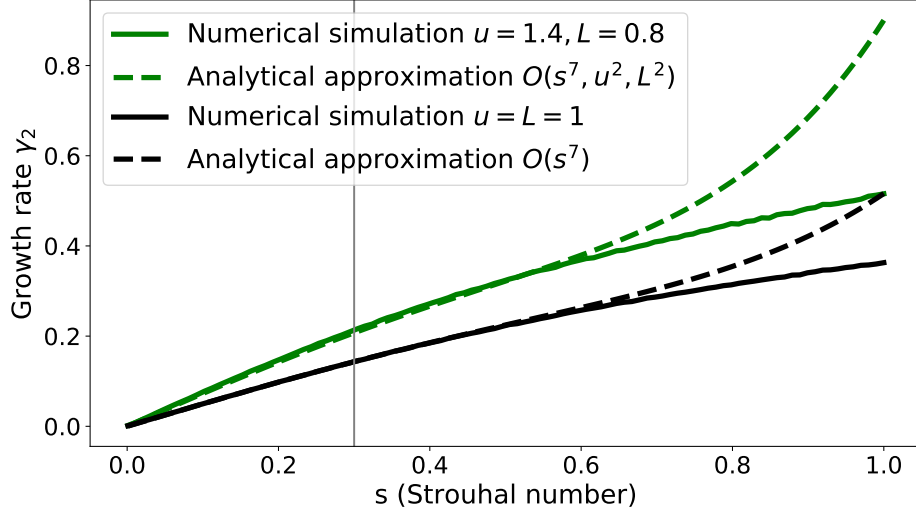


Рис. 5: Скорость роста для трехмерной изотропной модели потока $u = L = 1$ (черная линия) по сравнению со случаем анизотропии $u = 1.4, L = 0.8$ (зеленая линия) для различных чисел Струхала s . Рисунок из работы 8 из списка публикаций.

Раздел завершается рассмотрением двумерной модели и выводом соответствующих скоростей роста:

$$\gamma_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\varepsilon}{8}\right) s - \frac{1}{3} \left(1 + \frac{\varepsilon}{4}\right) s^3 + \frac{4}{9} \left(1 + \frac{3\varepsilon}{8}\right) s^5, \quad (26)$$

где $\varepsilon = u - L$.

В **разделе 2.6** проводится сопоставление оценок скорости роста второго момента, полученных в рамках модели с обновлениям, с найденными ранее оценками в короткокоррелированном приближении, и показано согласие результатов.

В **разделе 2.7** формулируется обобщение метода на случай смеси гауссовских распределений и приводится пример вывода оценок.

В **разделе 2.8** обсуждается область применимости разработанных методов и полученных результатов в контексте теории динамо.

Глава 3 посвящена разработке методов ассимиляции наблюдательных данных в динамо-моделях. В качестве примера рассматривается маломодовая модель динамо и ее параметры – динамо-число и функция подавления альфа-эффекта. Функция подавления заменяется на нейронную сеть и, используя метод нейродифференциальных уравнений, подбираются ее параметры так, чтобы получить согласие решения системы и наблюдательных данных.

В **разделе 3.1** формулируется метод нейродифференциальных уравнений и поясняется способ вычисления градиентов целевой функции на основе сопряженной системы уравнений.

В разделе 3.2 дается описание маломодовой модели динамо вида

$$\begin{aligned}\dot{B}(t) &= -iDA(t) - B(t), \\ \dot{A}(t) &= \alpha(B(t))B(t) - A(t),\end{aligned}\tag{27}$$

параметрами которой являются динамо-число D и функция подавления альфа-эффекта $\alpha(B)$. Незвестная функция $\alpha(B)$ параметризуется с помощью модели полносвязной нейронной сети и подлежит оптимизации вместе с набором начальных значений $A_0 = A(t_0)$, $B_0 = B(t_0)$ и динамо-числом D . Градиенты по параметрам модели, необходимые для процесса оптимизации, вычисляются с помощью метода сопряженных уравнений. Общая схема процесса показана на рисунке 6.

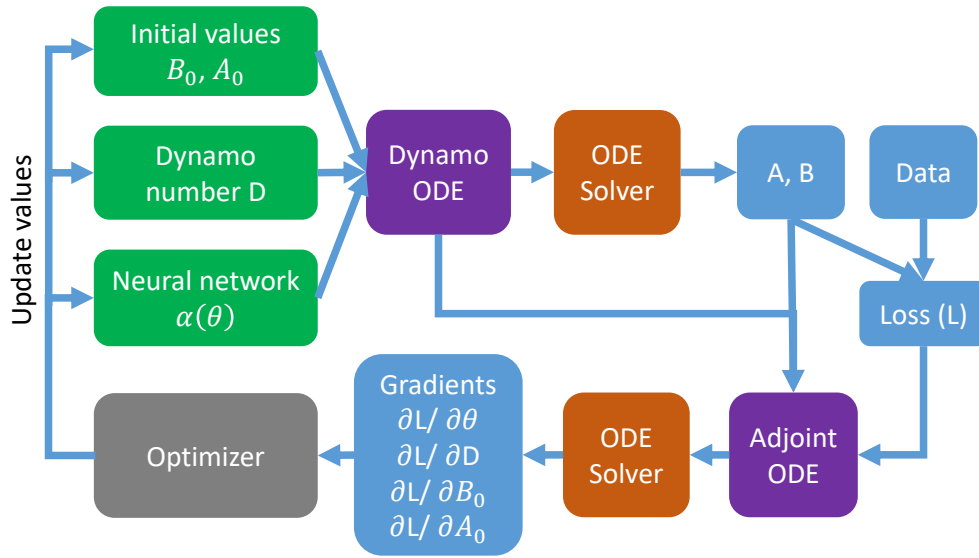


Рис. 6: Процесс оптимизации нейродифференциальной модели. Текущие значения оптимизируемых параметров передаются в модель динамо, численное решение (поля A и B) сравнивается с целевыми данными, вычисляется функция потерь. На основе исходной СДУ, решений A , B и функции потерь строится сопряженная СДУ, ее интегрирование дает градиенты функции потерь относительно параметров модели. Оптимизатор использует градиенты для обновления параметров модели. Рисунок из работы 2 из списка публикаций.

В разделе 3.3 ставится задача восстановления параметров модели динамо на основе синтетических данных, полученных моделированием при некоторых заданных параметрах. На рисунке 7 показан результат подбора параметров модели, обеспечивающих воспроизведение заданного набора значений ReB^2 . Из рисунка следует, что соответствие может быть достигнуто с использованием функции α , которая значительно отличается от той, что использовалась для моделирования целевых значений ReB^2 .

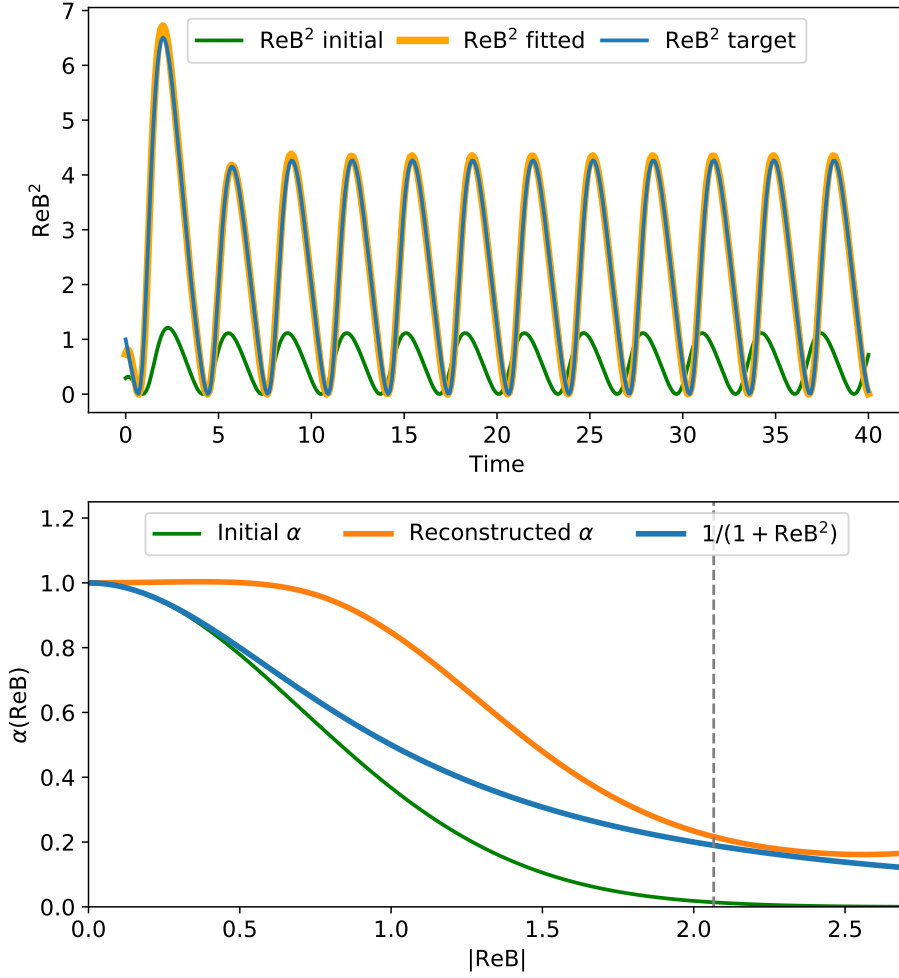


Рис. 7: Вверху: сравнение начального состояния модели (зеленая линия), модели после обучения (оранжевая линия) и целевого значения ReB^2 (синяя линия). Внизу: начальная функция α (зеленая линия), реконструированная (оранжевая линия) и истинная (синяя линия) функции α . Рисунок из работы 2 из списка публикаций.

Далее изучается вопрос о том, насколько могут варьироваться параметры динамо-модели при использовании разного количества информации о магнитном поле для обучения. Рассматривается три сценария: (i) используются значения только ReB^2 , (ii) используются значения ReB^2 и ReA , (iii) используется полный набор ReB, ImB, ReA, ImA . На рисунке 8 показано, что во всех случаях достигается высокое соответствие с целевыми значениями. Наибольшая вариативность функций $\alpha(B)$ возникает при подгонке только ReB^2 , и уменьшается при дополнении ReB^2 данными о магнитном поле, при этом восстановленные функции α сходятся к истинной. Обнаруживается, что увеличение значения динамо-числа соответствует более быстрому затуханию функции α , а когда динамо-число становится достаточно велико, функция α становится немонотонной.

В разделе 3.4 параметры модели динамо подбираются на основе на-

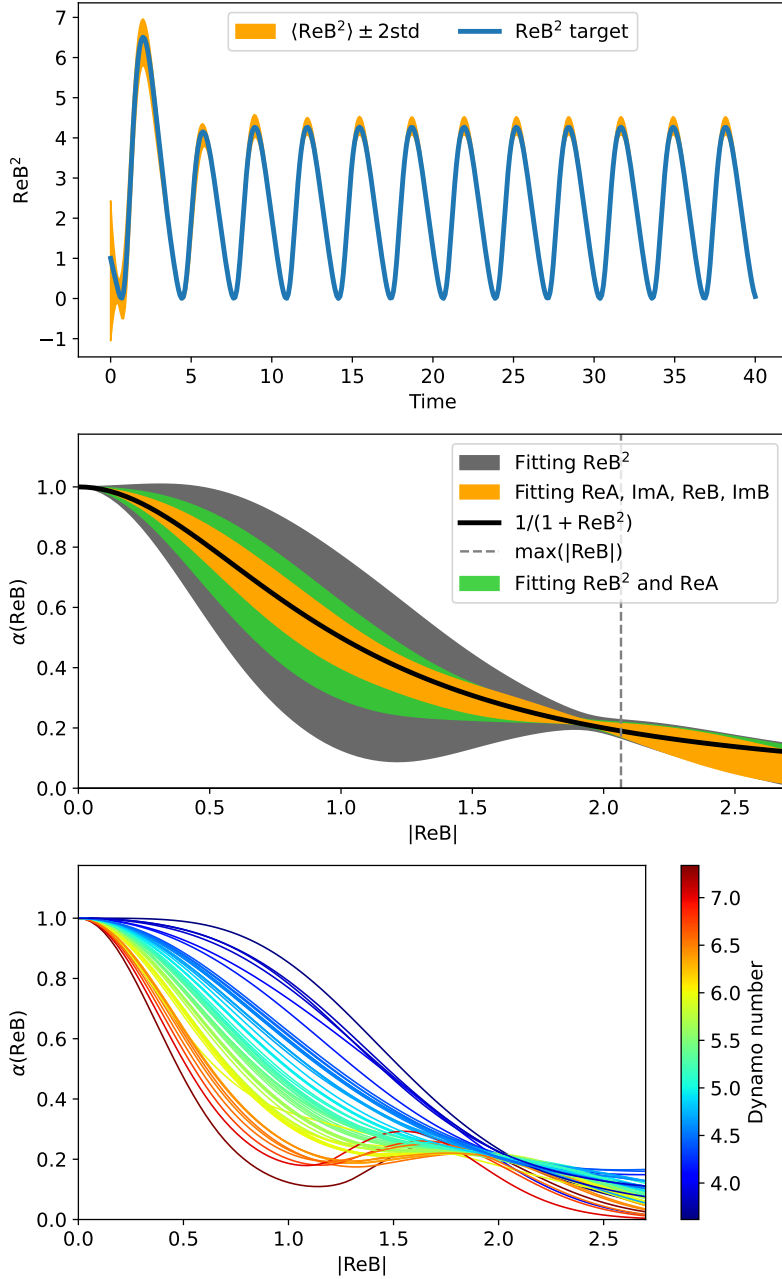


Рис. 8: Вверху: вариативность (в пределах двух стандартных отклонений) значений ReB^2 (оранжевая область) после обучения моделей и целевые значения ReB^2 (синяя линия). По центру: вариативность реконструированных функций α для разных наборов целевых значений. Черная линия – истинная функция $\alpha(B) = 1/(1 + ReB^2)$. Внизу: реконструированные функции α , окрашенные в соответствии со значением динамо-числа. Рисунок из работы 2 из списка публикаций.

блюдательных данных, представленных средним профилем цикла солнечной активности. Рисунок 9 показывает, что нейродифференциальный подход позволяет с хорошей точностью аппроксимировать асимметричную форму среднего цикла: быструю ветвь роста и медленную ветвь спада.

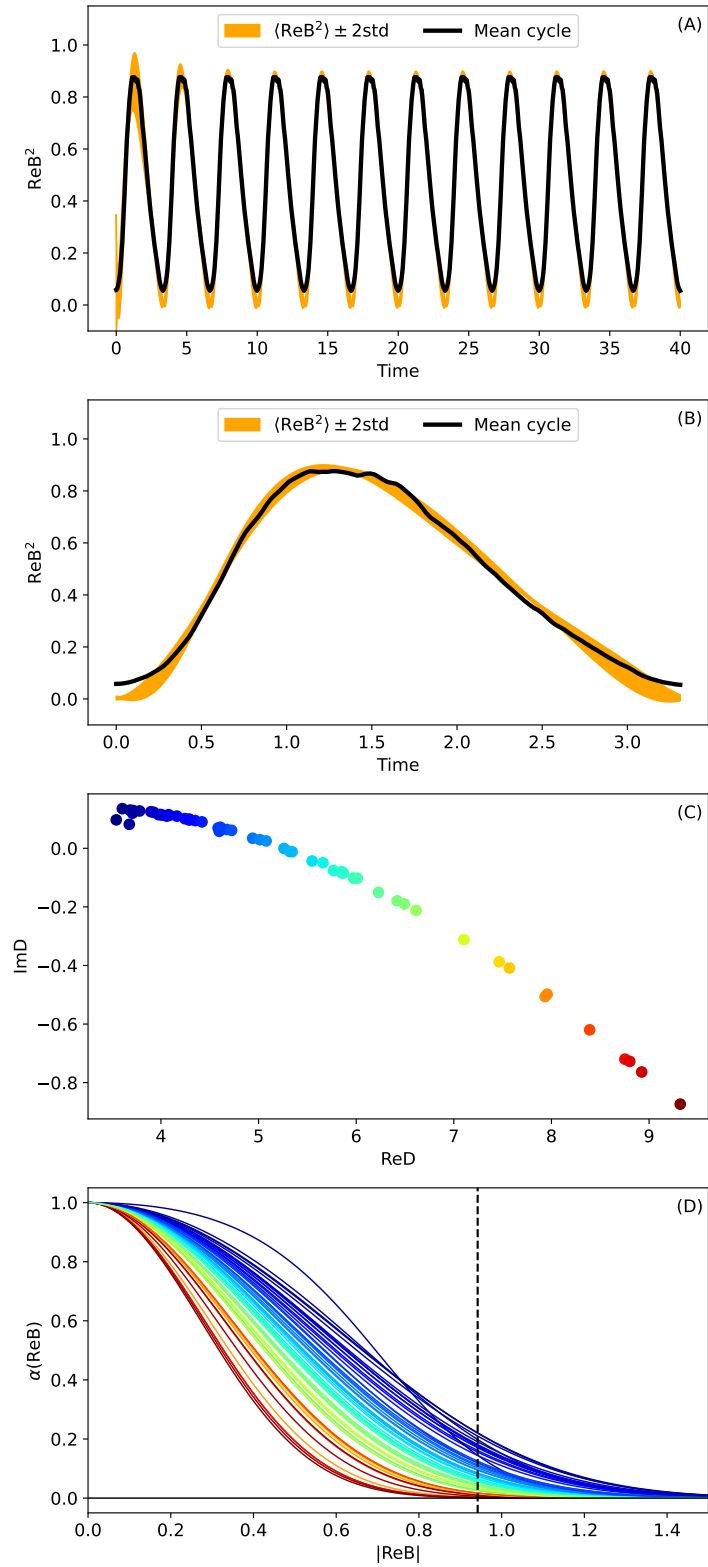


Рис. 9: Панель А: вариативность полученных моделей (оранжевая область) в сравнении со средним профилем цикла (черная линия). Панель В: последний цикл из верхней панели. Панели С и D: вариативность комплексных динамо-чисел и соответствующих функций α . Рисунок из работы 2 из списка публикаций.

Аналогично синтетическим случаям, наблюдается большая вариативность функции $\alpha(B)$ и динамо-числа D , обеспечивающих данную аппроксимацию, и увеличение значения ReD приводит к более быстрому затуханию $\alpha(B)$.

В **разделе 3.5** обсуждаются особенности реализации подхода на основе нейродифференциальных уравнений, делается вывод о том, что полученные результаты демонстрируют возможность использования нейродифференциальных моделей для адаптации динамо-моделей под наблюдательные данные.

Глава 4 посвящена разработке автоматических методов обработки наблюдательных данных, воспроизводящих результаты эталонной ручной обработки. Рассматривается задача сегментации корональных дыр (КД) на основе изображений SDO/AIA 193 Å и каталога карт КД Кисловодской горной астрономической станции с использованием методов машинного обучения.

В **разделе 4.1** дается описание набора данных и методов предварительной обработки. Приводится описание созданного сводного каталога карт солнечной активности – сайта observethesun.ru. Обсуждается релевантность данных, на основе которых будет проводится обучение моделей. Показывается, что параметры КД позволяют получить высокую корреляцию с долговременными вариациями солнечного ветра и это свойство можем служить критерием для оценки качества данных в каталогах КД. Показано, что основной вклад в долговременные вариации солнечного ветра создают низкоширотные КД.

В **разделе 4.2** ставится задача машинного обучения для сегментации изображений, кратко излагаются принципы работы сверточных нейронных сетей. На рисунке 10 показана архитектура нейронной сети типа U-net, предложенной для сегментации КД. На вход модель принимает изображение солнечного диска, на выходе формируется карта сегментации, на которой значения близкие к 1 интерпретируются как пиксели, принадлежащие КД, а значения близкие к 0 – как пиксели, лежащие вне границ КД.

В **разделе 4.3** результаты работы модели сравниваются с эталонными картами КД и показана высокая степень соответствия. Проводится сопоставление с другими моделями сегментации КД. Пример выделенных КД в сравнении с картами КД из каталогов Sprosa и CHIMERA показан на рисунке 11.

В **разделе 4.4** формулируется задача сегментации корональных дыр на синоптических картах и обсуждаются отличия от сегментации на изображениях солнечного диска.

В **разделе 4.5** приводится алгоритм построения синоптических карт по изображениям SDO/AIA 193 Å. Дается описание созданного каталога синоптических карт.

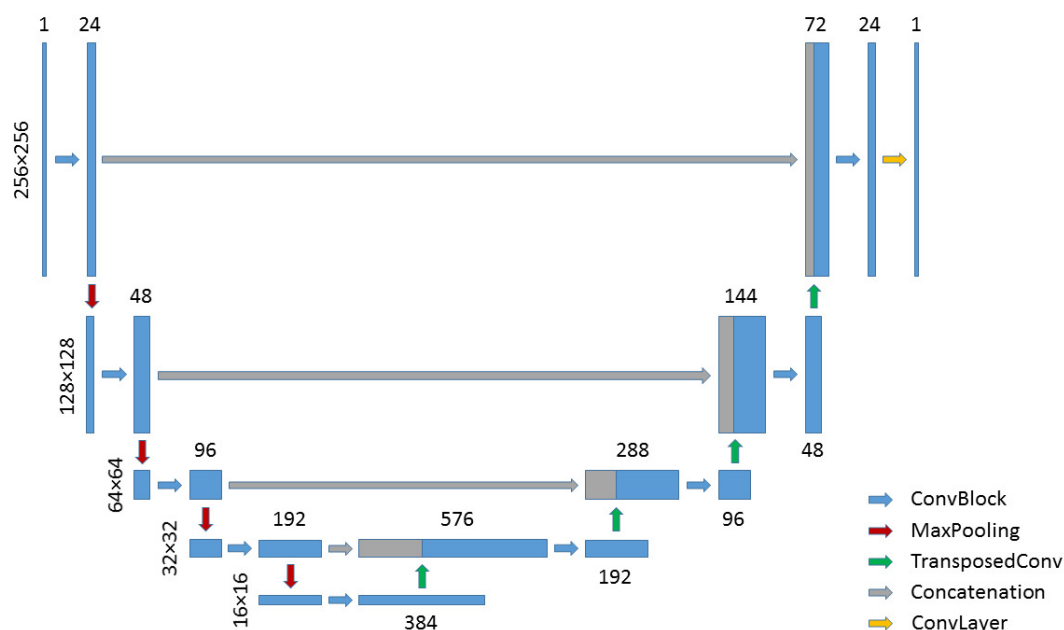


Рис. 10: Архитектура нейронной сети для сегментации КД. Числа указывают размеры массивов, цветные стрелки соответствуют различным операциям, обозначенным на рисунке. Рисунок из работы 10 из списка публикаций.

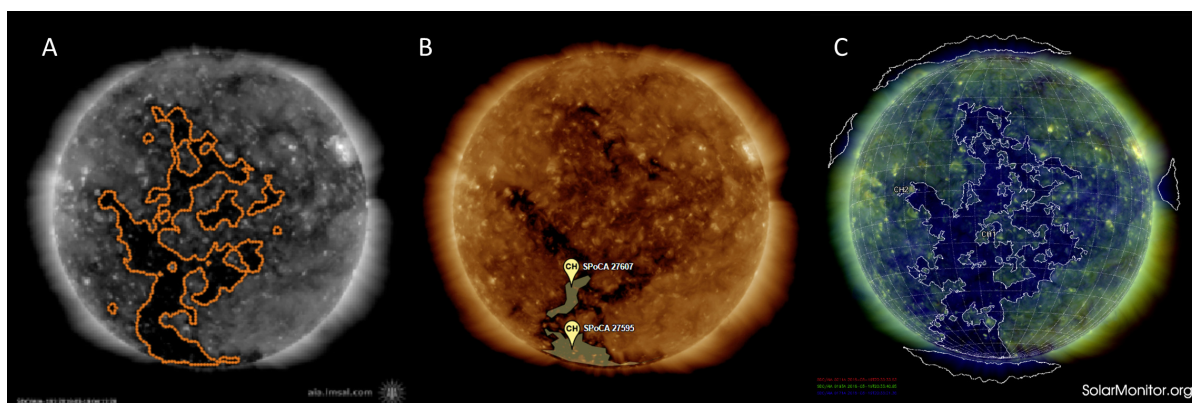


Рис. 11: Карты КД на 19 марта 2018 года, полученные моделью U-Net (A), SPOCA (B) и CHIMERA (C). Рисунок из работы 10 из списка публикаций.

В разделе 4.6 приводится методика сегментации КД на синоптических картах на основе модели, ранее обученной на изображениях солнечного диска. Примеры выделяемых КД на синоптических картах показаны на рисунке 12.

В разделе 4.7 проводится анализ каталога синоптических карт КД. Показано существование асимметрии в стадиях развития и амплитудах КД между северным и южным полушариями. Изучаются широтно-временные особенности распределения КД и магнитного поля в КД. На рисунке 13 приведена широтно-временная диаграмма усредненного по долготе магнитного поля внутри КД в сравнении с фотосферным магнитным полем. Показано,

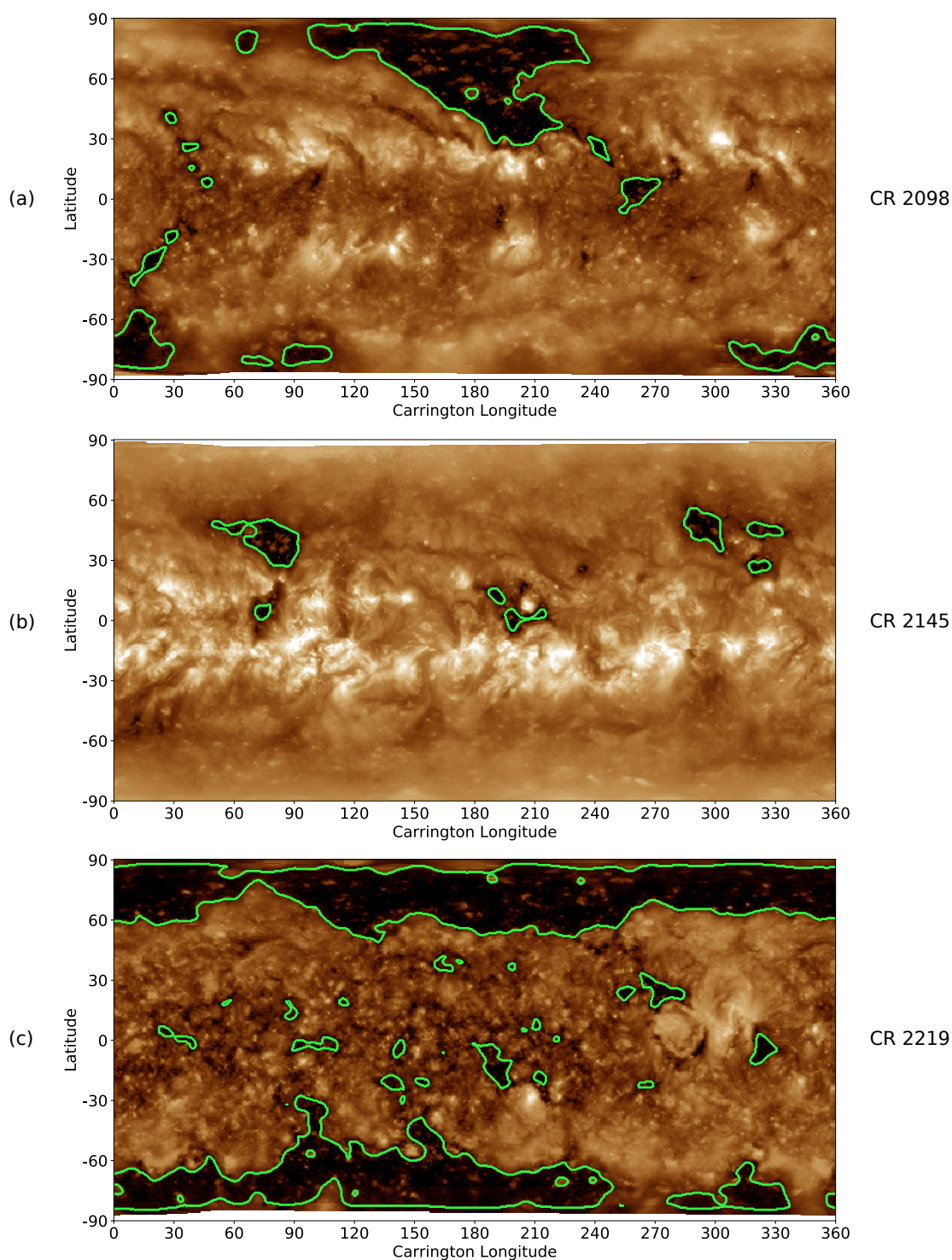


Рис. 12: Синоптические карты и границы КД (зеленые линии) для кэррингтоновских оборотов 2098 (a), 2145 (b) и 2219 (c). Рисунок из работы 9 из списка публикаций.

что помимо переноса магнитного потока с низких широт, должны существовать и другие механизмы формирования полярных КД.

В разделе 4.8 дается сопоставление предложенной модели со стандартным методом пороговой сегментации. Делается вывод о существенном раз-

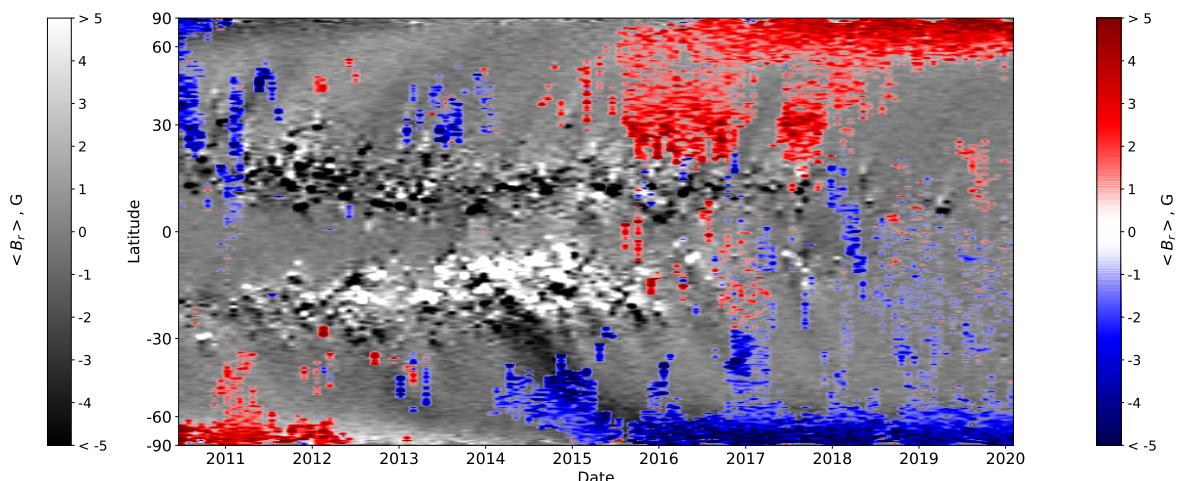


Рис. 13: Широтно-временная диаграмма усредненного по долготе магнитного поля внутри КД (показано синими и красными цветами) и магнитного поля, усредненного по всем долготам (серая карта). Рисунок из работы 9 из списка публикаций.

личии этих методик.

В разделе 4.9 приводится описание созданного каталога синоптических карт КД. Обсуждаются границы применимости метода сегментации и перспективы построения фундаментальных моделей машинного обучения, преодолевающие недостатки стандартных подходов к обучению моделей.

Глава 5 посвящена вопросу описания геометрической структуры групп солнечных пятен, сохраняющему тонкие детали строения группы.

В разделе 5.1 приводится методика составления каталога групп солнечных пятен и их базовых параметров на основе каталогов Кисловодской горной астрономической станции.

В разделе 5.2 дается постановка задачи параметризации как задачи понижения размерности данных. Обсуждаются линейные и нелинейные подходы.

В разделе 5.3 представлена модель параметризации групп пятен на основе модели машинного обучения (сверточного вариационного автоэнкодера) и метода главных компонент. Формулируется функция ошибки, используемая при обучении модели. Изучается влияние конфигурации модели на точность реконструкции изображения группы солнечных пятен. На рисунке 14 показано, как выбор числа главных компонент в латентном пространстве вариационного автоэнкодера сказывается на восстановлении изображения групп разной сложности.

В разделе 5.4 проводится исследование структуры пространства новых параметров. Основным результатом является выделение связи с физическими параметрами. Например, на рисунке 15 показано, что обнаруживаются параметры, отвечающие за однопятенную или многопятенную структуру

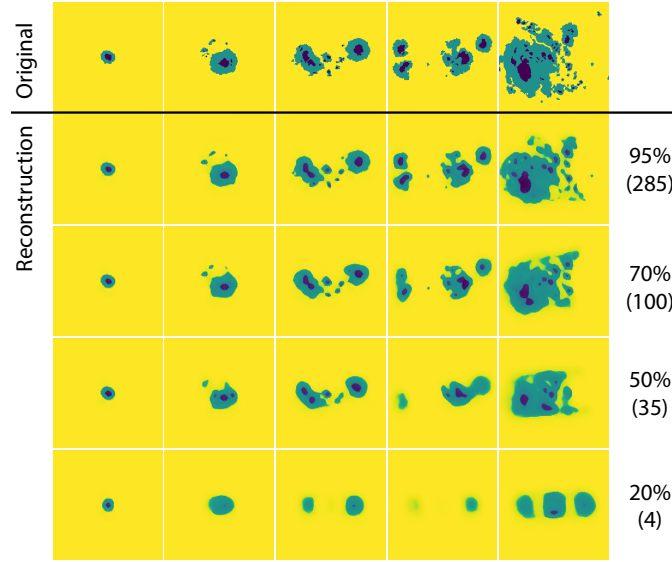


Рис. 14: Точность реконструкции в зависимости от количества латентных параметров. В верхнем ряду показаны примеры групп солнечных пятен. В следующих рядах – реконструкция по разному числу параметров, указанному справа в скобках. Проценты показывают долю объясненной дисперсию. Рисунок из работы 7 из списка публикаций.

группы (параметр Z_1) и за ее наклон (параметр Z_5).

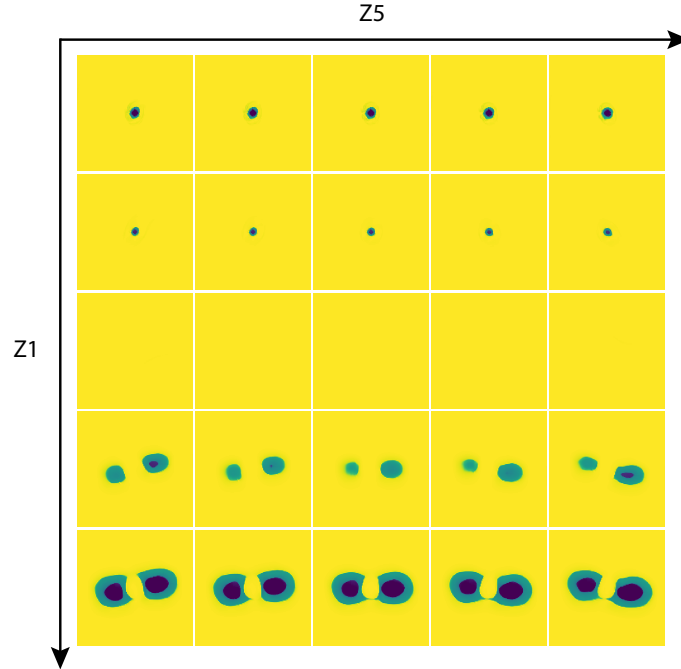


Рис. 15: Изображения группы солнечных пятен для различных значений латентных параметров Z_1 и Z_5 . Параметр Z_1 варьируется от -20 до 20 с шагом 10 и Z_5 от -5 до 5 с шагом 2.5 . Рисунок из работы 7 из списка публикаций.

В разделе 5.5 на основе новых параметров предлагается процедура оценки сложности структуры групп солнечных пятен.

В разделе 5.6 на основе новых параметров предлагается модель классификации групп пятен и проводится сопоставление с Цюрихской системой классификации. Показано, что новые параметры позволяют оценивать Цюрихский класс группы.

В разделе 5.7 приводятся другие приложения моделей понижения размерности: описание профилей спектральных линий, прогноз протонных событий.

В разделе 5.8 дается общий вывод из представленных результатов и, в частности, вывод о том, что предложенный подход является новым инструментом исследования данных, а именно – извлечения значимых параметров, характеризующих наблюдательные данные.

Глава 6 посвящена методам оцифровки исторических наблюдений и восстановлению параметров солнечной активности. Рассматриваются две серии наблюдений: (1) каталоги Цюрихской обсерватории, покрывающие конец 19 – начало 20 века, и (2) каталоги французского астронома О. Флоржера, покрывающие период минимума Дальтона (первая треть 19 века).

В разделе 6.1 методами машинного обучения проводится оцифровка каталогов Цюрихской обсерватории. В начале раздела обсуждается структура каталогов и особенности программы наблюдений Цюрихской обсерватории. Пример страницы из каталога показан на рисунке 16.

В подразделе 6.1.1 приводится общий план процедуры оцифровки. Он состоит из разделения табличной страницы на отдельные ячейки, определения типа наблюдений (пятно, факел, протуберанец), первичной оцифровки координат, записанных в ячейках, определения параметров линейной связи между столбцами, постраничного дообучения модели, оценки степени уверенности модели и вывода наиболее согласованного результата оцифровки. Далее каждый из шагов обсуждается подробно в последующих подразделах.

В подразделе 6.1.2 описана процедура определения разметки страниц каталога с помощью линейных фильтров. Для определения типа наблюдений, кодируемого цветом чернил, применяется алгоритм кластерного анализа в RGB пространстве. Для оцифровки числа предлагается сверточно-рекуррентная модель нейронной сети (CRNN). Для обучения модели используется функция потерь, известная как connectionist temporal classification (CTC), и набор предварительно аннотированных данных. Показано, что на тестовой части выборки точность модели составляет 97%. Далее предлагается способ оценки уверенности предсказания модели. Показано, что среди ответов с высокой уверенностью доля ошибок становится меньше.

В подразделе 6.1.3 предлагается процедура автоматического дообу-

1916	Objekt	P_R	P'	P	$P+q$	β	λ'	$\lambda+k$	b	l	L	B	H
				84.2	71.4	-1.4	+87.2	22.0	+4.5	22.0	200.1	1.5	-
				80.4	87.6	+2.4	87.2	22.0	8.3	32.3	200.4	0.7	-
				67.7	74.5	12.5	87.2	22.0	17.4	23.1	201.2	4.0	-
I 7.45	0.8 a. Promin.					-11.8	-40.0	16.4	-18.3	162.0	317.2		
	e. ul.					-11.0	-37.0	161.8	-17.6	161.1	316.8		
	f. ul.					-12.5	-31.7	154.5	-18.3	152.2	307.4		
	g. ul.					-12.6	-30.0	152.8	-17.2	151.8	307.5		
	3 a. Promin.					-12.0	+12.0	109.6	-14.3	108.1	262.8		
	e. ul.					-9.6	14.0	108.4	-11.2	102.1	262.8		
	7 ul.					+38.1	12.2	110.4	+15.4	115.0	270.7		
	4 a. f. ul.					11.0	24.8	87.8	11.2	87.0	244.7		
	e. ul.					12.5	27.6	85.8	12.1	86.5	242.2		
	6 ul.					14.6	45.2	77.4	16.1	77.0	234.7		
	A.					+18.0	-43.0	205.6	+11.2	204.8	0.5		
	2					21.0	-80.0	202.6	14.2	201.2	357.4		
	3					23.9	-77.0	201.6	17.4	200.2	356.4		
	4					15.0	-78.0	201.2	28.5	200.7	356.4		
	5					18.0	-78.0	207.6	11.8	206.8	2.5		
	6					23.0	-76.0	198.6	14.4	197.2	352.4		
	7					22.0	-74.2	197.8	15.4	196.4	352.4		
	8					28.0	-76.0	196.6	21.4	195.8	351.2		
	9					28.8	-69.8	192.4	22.0	191.8	347.5		
	10					27.0	-65.0	187.8	22.1	187.4	343.1		
	11					20.8	-66.0	188.6	17.2	188.1	342.8		

Рис. 16: Основные элементы страницы каталога. Зеленые рамки показывают дату и время наблюдения и две колонки с широтой и долготой. Красная рамка содержит координаты протуберанцев, черная – солнечных пятен, синяя – факелов. Рисунок из работы 6 из списка публикаций.

чения, позволяющая модели адаптироваться к изменениям почерка и новым особенностям страниц. Процедура основана на наличии линейной связи между столбцами и составлении функции потерь, которая использует эту связь. Показано, что в результате дообучения повышается точность модели и одновременно повышается уверенность в правильных ответах. На основе предложенной процедуры проводится оцифровка полного набора каталогов.

В подразделе 6.1.4 приводятся широтно-временные диаграммы распределения пятен, факелов и протуберанцев по оцифрованным координатам. Пример широтно-временной диаграммы для солнечных пятен показан на рисунке 17. Результаты оцифровки пятен сопоставляются с данными о положении центров групп пятен из каталога Гринвичской обсерватории и показана высокая степень соответствия данных. Тем самым, результат оцифровки координат пятен Цюрихской обсерватории может быть использован для детализации информации о группах из каталога Гринвичской обсерватории.

В подразделе 6.1.5 дается описание базы данных оцифрованных координат, обсуждаются обнаруженные особенности солнечной активности по восстановленным данным. в период столетнего солнечного минимума в

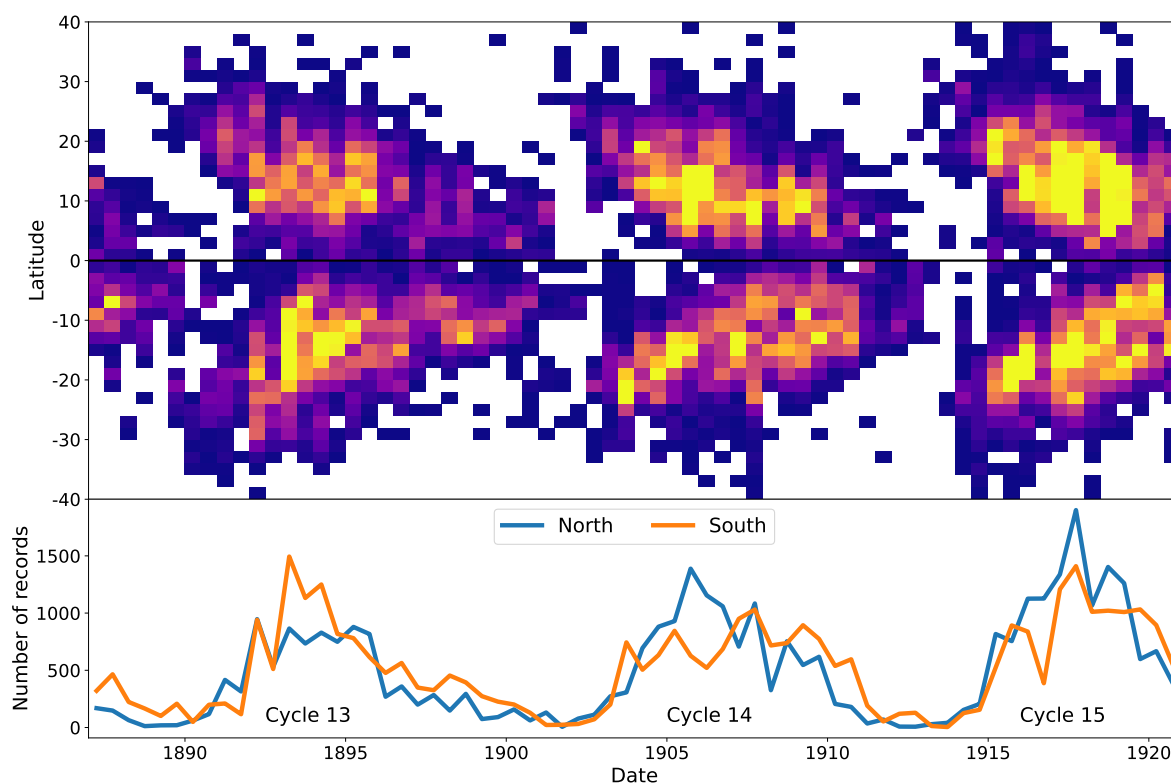


Рис. 17: Верхняя панель: широтно-временное распределение восстановленных координат солнечных пятен из каталогов Цюрихской обсерватории. Данные группировались в интервалах длины 6 месяцев по времени и 4° по широте. Нижняя панель: общее количество солнечных пятен в северном полушарии (синяя линия) и в южном полушарии (оранжевая линия). Рисунок из работы 6 из списка публикаций.

начале 20 века: асимметрию в фазах миграции факелов к полюсам в северном и южном полушариях, высокую корреляцию числа протуберанцев и солнечных пятен в 13 и 14 цикле и их аномально низкое соотношение в цикле 15.

В завершении приводится результат приложения модели к задаче оцифровки даты и времени снимков из архива патрульных наблюдений обсерватории Сакраменто-Пик. Высокая точность полученных результатов для нового набора данных позволяет говорить о высокой практической значимости разработанного подхода для оцифровки исторических данных.

Раздел 6.2 посвящен разработке методики восстановления гелиографических координат солнечных пятен в период минимума Дальтона из каталогов транзитных наблюдений французского астронома О. Флержера.

В подразделе 6.2.1 приводится описание каталогов транзитных наблюдений. На первом этапе оцифровки из каталогов были выписаны все записи, относящиеся к солнечным пятнам. Отмечается, что для наблюдений использовались разные конфигурации сеток, детали строения и ориентации которых заранее известны не были. Пример записи наблюдений транзита

солнечного диска и солнечного пятна в прямоугольной сетке приведен в таблице 2.

Таблица 2: Наблюдения 7 июля 1796. Ось h – горизонтальная, v – вертикальная.

Объект	Ось	Время
Лимб Солнца	h	06:48:43
Лимб Солнца	v	06:49:48
Пятно	h	06:50:44
Пятно	v	06:51:48
Лимб Солнца	h	06:51:57
Лимб Солнца	v	06:53:06

В подразделе 6.2.2 предлагается метод восстановления гелиографических координат из транзитных наблюдений, сделанных в прямоугольной сетке. На рисунке 19 показана реконструкция транзита пятна, приведенного в таблице 2.

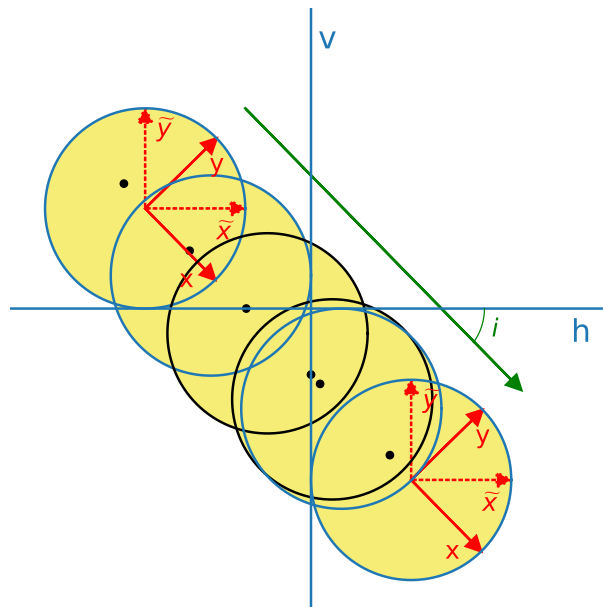


Рис. 18: Последовательность контактов солнечного диска и солнечного пятна, соответствующая таблице 2. Рисунок из работы 5 из списка публикаций.

Приводится обоснование методики на основе письменных источников и согласованности получаемых результатов. Пример серии восстановленных гелиографических координат показан на рисунке 19.

В подразделе 6.2.3 предлагается метод восстановления гелиографических координат из транзитных наблюдений, сделанных в косой сетке. Приводится метод оценки угла, образующего косую сетку. Показывается согласованность серий восстановленных координат.

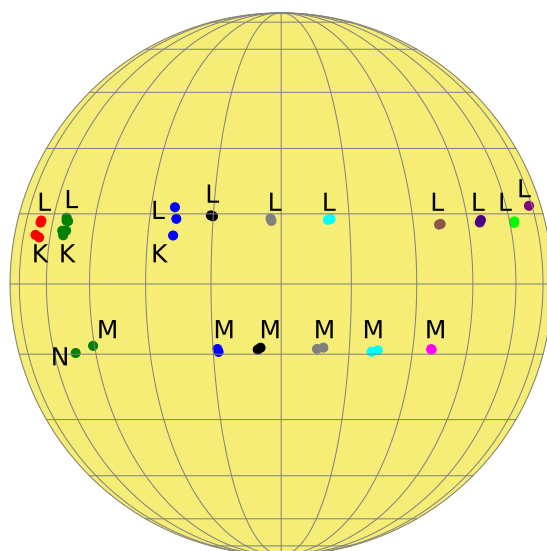


Рис. 19: Восстановленные гелиографические координаты солнечных пятен за период 1 по 12 сентября 1796. Разные цвета соответствуют разным дням. Рисунок из работы 5 из списка публикаций.

В подразделе 6.2.4 предлагается метод восстановления гелиографических координат из транзитных наблюдений, сделанных в ромбической сетке. Приводится метод оценки угла, образующего вершину ромба. Показывается согласованность серий восстановленных координат.

В подразделе 6.2.5 приводится метод восстановления координат солнечных пятен, наблюдаемых во время солнечных затмений, на основе реконструкции солнечных затмений. Показана согласованность восстановленных координат с наблюдениями, сделанными в тот же момент в ромбической сетке.

В подразделе 6.2.6, используя записи наблюдений транзита Меркурия и программную реконструкцию транзита Меркурия по диску Солнца, приводится оценка точности измерений. Показано, что погрешность имеет величину порядка относительного размера диска Меркурия.

В подразделе 6.2.7 представлена широтно-временная диаграмма (рисунок 20) восстановленных координат солнечных пятен в период минимума Дальтона в сравнении с другими сериями наблюдений. На основе восстановленных данных показано существование долгоживущих групп пятен, наблюдавшихся более одного солнечного оборота. Получены новые подтверждения асимметрии пятенной активности между северным и южным полушарием в период минимума Дальтона. Получены новые свидетельства аномальной длительности цикла 4. При этом отсутствие измерений в 1793–94 годах не позволяет сделать однозначного вывода о существовании короткого («потерянного») цикла между циклами 4 и 5.

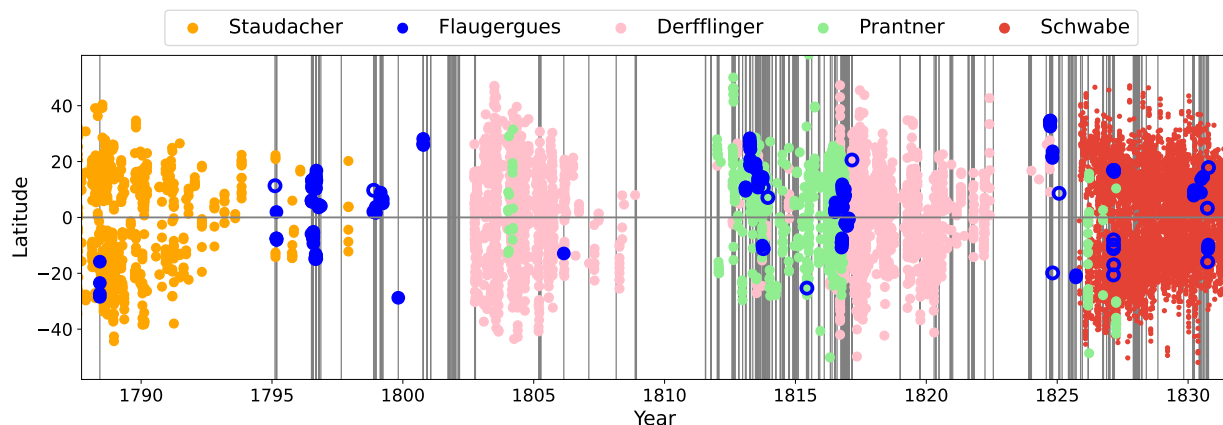


Рис. 20: Широтно-временное распределение положений солнечных пятен, полученных из наблюдений Флогерга (синие точки). Сплошные синие круги показывают положения солнечных пятен, классифицированные как надежные, незакрашенные синие круги – менее уверенные. Дни с записями контактов отмечены серыми вертикальными линиями. Для сравнения приведены положения солнечных пятен из ранее реконструированных данных других наблюдателей. Оранжевые точки – распределение солнечных пятен по каталогам Штаудахера и Армага, розовые – по каталогам Дерффлингера, зеленые – по рисункам Прантнера, красные – по рисункам Швабе. Рисунок из работы 5 из списка публикаций.

В **Заключении** подводятся итоги работы и обсуждаются дальнейшие направления исследований.

В диссертационной работе показано, что задачи параметрического описания процессов и явления возникают в самых различных аспектах физики Солнца: от исследования динамо-моделей до анализа наблюдательных данных. Предложенное в работе новое направление, основанное на использовании методов машинного обучения, позволяет эффективно решать эти задачи и приводить к новым результатам в физике Солнца.

Для ассимиляции наблюдательных данных в моделях динамо был разработан подход на основе нейродифференциальных уравнений. С его помощью на примере маломодовой модели динамо были получены оценки динамо-числа и вид функции подавления альфа-эффекта, при которых удастся близко воспроизвести средний профиль солнечного цикла.

Для аналитического исследования моделей динамо и подкрепления результатов численного моделирования был разработан подход на основе теории случайных матриц. С его помощью получены оценки скорости роста магнитного поля на начальной стадии динамо, исследованы сценарии роста статистических моментов векторных полей, основанные на сочетании эффектов резонанса и перемежаемости.

Для анализа более тонких явлений солнечной активности были разрабо-

таны методы обработки наблюдательных данных, основанные на машинном обучении. Этот подход позволил по-новому взглянуть на процесс постановки и решения задач. Если раньше методы обработки представляли собой либо ручной процесс, либо строились как явный алгоритм, то для методов машинного обучения ключевым становится формулировка критериев качества и наличие большой выборки. Поскольку, как правило, предложить критерий качества оказывается проще, чем явный алгоритм решения задачи, и для современной физики Солнца стали доступны большие серии данных, то предложенное направление имеет все основания для дальнейшего успешного развития.

В работе была представлена модель для сегментации корональных дыр, обученная на эталонных примерах ручной обработки дисковых изображений Солнца и показано, что модель обеспечивает схожий результат. При обучении использовались данные за 24 цикл солнечной активности, однако модель продолжает устойчиво работать в новом 25 цикле, формируя однородный ряд данных по КД, на основе которого возникла серия работ по анализу свойств КД. Было показано наличие асимметрии между северным и южным полушарием в стадиях развития КД и присутствие нескольких сценариев формирования полярных КД. Продемонстрированная высокая корреляция КД и скорости солнечного ветра открывает перспективу использования модели в службе прогноза космической погоды.

Необходимым условием для распространения методов автоматической сегментации на другие типы активных областей является наличие эталонной выборки. Поскольку ее сбор является трудоемким процессом, представляет интерес развитие методов, основанных на фундаментальных моделях машинного обучения, позволяющих снизить необходимый объем обучающей выборки по сравнению со стандартным подходом.

В работе была показана эффективность подхода, основанного на машинном обучении, для описания структуры активных областей. Показано, что при обучении на большом наборе примеров активных областей, формируется компактный набор параметров, содержащий как стандартные физические параметры области, так и дополнительные параметры, позволяющие передавать тонкие детали строения области. На основе полученного набора показана возможность оценки класса группы солнечных пятен, что в перспективе может быть использовано для повышения точности моделей прогноза солнечных вспышек.

Наконец, особую ценность методы машинного обучения приобретают при оцифровке больших рядов исторических данных. Неоднородность и наличие артефактов затрудняют использование стандартных подходов, а объем данных – ручную обработку. В работе предложен подход, основанный на машинном обучении, который позволил провести оцифровку каталогов Цюрихской обсерватории и получить детальную картину распределения

солнечных пятен, факелов и протуберанцев в период столетнего минимума солнечной активности. Показано, что метод может быть успешно адаптирован к схожим задачам. На его основе была проведена оцифровка ряда патрульных наблюдений обсерватории Сакраменто-Пик.

Оцифровка более отдаленного во времени архива О. Флержера потребовала трудоемкой ручной работы, поскольку записи о транзитах солнечных пятен занимают лишь малую долю в нем и существенно менее строго форматированы по сравнению с более поздними каталогами. Автоматическая оцифровка подобных записей все еще представляет трудность для методов машинного обучения. Расширение возможностей автоматических методов – необходимый шаг для ускорения процесса обработки исторических каталогов и создания долговременных рядов данных по солнечной активности.

Важным моментом при разработке моделей машинного обучения является учет физического контекста задачи. Эта проблема может решаться за счет архитектуры модели, увеличения объема и вариативности обучающей выборки и методов постаобработки данных. В дальнейшем представляет интерес модификация процесса обучения, при которой физические ограничения закладываются напрямую на этапе обучения, например, как это происходит в рамках физически-информированных нейронных сетей.

Стоит отметить, что с момента начала в 2010-х годах обширного вовлечения методов глубокого машинного обучения в различные задачи (поначалу вне контекста физики Солнца) и до сегодняшнего дня прошло лишь чуть более десяти лет. Однако за этот относительно короткий промежуток времени они стали самостоятельным направлением. Наглядным подтверждением этому служат специальные конференции и тематические выпуски журналов, посвященные применению машинного обучения в физике Солнца. Получаемые результаты вдохновляют на дальнейшие исследования и формируют качественно новый уровень возможностей для физики Солнца.