



УТВЕРЖДАЮ:

И.о. декана механико-математического  
факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Чубариков Владимир Николаевич

«27» октября 2016 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

кафедры теории вероятностей механико-математического факультета  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова  
от 26 октября 2016 г.

**Диссертация** Илларионова Егора Александровича «Количественные показатели эволюции магнитных полей на Солнце» выполнена на кафедре теории вероятностей механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

В период подготовки диссертации (2013—2016 г.) соискатель Илларионов Егор Александрович учился в очной аспирантуре кафедры теории вероятностей механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», и работал на кафедре в должности младшего научного сотрудника (должность, занимаемая в настоящее время).

В 2013 году окончил механико-математический факультет Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по специальности «Математика».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2016 году Федеральным государственным бюджетным учреждением высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

**Научный руководитель** – д.ф.-м.н. Соколов Дмитрий Дмитриевич, профессор кафедры математики физического факультета Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

**Присутствовали:** профессора: Афанасьева Л.Г., Булинская Е.В., Булинский А.В., Виноградов О.П., Дьячков А.Г., Сенатов В.В., Тутубалин В.Н., Фалин Г.И., Гуцин А.А., Каштанов В.А., Конаков В.Д., Оселедец В.И., Пирогов С.А., Соколов Д.Д., Яровая Е.Б., г.н.с.: В.А. Малышев, В.И. Питербарг, доценты: Болдин М.В., Гнеденко Д.Б., Жуленев С.В., Лебедев А.В., Манита А.Д., Чепурин Е.В., Gladkov Б.В., Шабанов Д.А., Баштова Е.Е., старшие преподаватели: Козлов В.В., Голдаева А.А., ассистент Каменов А.А., ученый секретарь ассистент Ряднова Е.М.

По итогам обсуждения диссертации «Количественные показатели эволюции магнитных полей на Солнце» приняли следующее **заключение**:

**Общая оценка работы.** Диссертация «Количественные показатели эволюции магнитных полей на Солнце» является законченным научным трудом, соответствующим требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Перечень опубликованных работ по теме диссертации состоит из 11 статей, в том числе в высокорейтинговых и рекомендуемых рецензируемых изданиях, что подтверждает уровень и степень актуальности работы. Диссертация может быть представлена в совет по защите докторских и кандидатских диссертаций.

**Актуальность работы.** Проблема получения количественных значений является актуальной в теоретических задачах и особенно остро встает в прикладных вопросах. В диссертационной работе изучается эволюция солнечных магнитных полей как со стороны аналитического исследования уравнений, так и с точки зрения оценки показателей на основе наблюдательных данных.

Проблема исследования поведения векторных полей, задаваемых системами уравнений со случайными коэффициентами, известна в теории вероятностей достаточно давно. Решения подобных уравнений выражаются через произведение случайных матриц, относительно которого был доказан ряд теорем (теоремы Ферстенберга), в которых формулируются условия, достаточные для экспоненциального роста нормы произведения. Позднее эти математические результаты были адаптированы под более прикладные задачи в работах В.Н. Тутубалина. Однако до сих пор не удавалось воспользоваться этими результатами для количественной оценки скоростей роста решений, даже в относительно несложных с виду системах. К таким нерешенным задачам относится нахождение скорости роста поля Якоби для модельного уравнения Якоби со случайным параметром кривизны. В представленной работе впервые удалось разрешить этот давно существующий вопрос. Более того, полученный результат подкрепляет оценки и ожидания, сформулированные в предшествующих работах, в которых скорости роста находились путем генерирования и усреднения достаточно большого числа реализаций поля Якоби.

Рассмотрение модельного уравнения Якоби показывает перспективы и актуальность применения теории произведения случайных матриц для исследования более сложных систем, к которым относится задача об эволюции магнитного поля в случайном потоке. Предложенный в работе метод позволяет найти оценки для скорости роста самого поля и его старших статистических моментов, из которых особый интерес представляет второй момент, характеризующий энергию магнитного поля.

В прикладном аспекте проблема получения количественных показателей вызвана неоднозначностью в интерпретации наблюдательных данных, а также их различной ограниченностью и неполнотой. В связи с этим возникает проблема устойчивой статистической обработки больших массивов данных и развития алгоритмических методов выделения структур на картах солнечной активности. С применением подобных методов оказывается возможным исследование более тонких вопросов эволюции активных областей и взаимосвязи их параметров. К таким вопросам относятся: 1) форма и положение циклов солнечной активности на баттерфляй-диаграммах; 2) изучение характера циклов по данным за исторический период; 3) распределение тилт-угла биполярных областей на широтно-временных диаграммах; 4) зависимость тилт-угла от положения и размеров активной области; 5) оценка величины альфа-эффекта, исходя из

данных о наклоне и магнитном потоке в активной области. Результаты, представленные в работе, в ряде случаев подтверждают стандартные ожидания, а в ряде других — содержат новые сведения.

**Личное участие соискателя.** В ходе работы над диссертацией Илларионов Е.А. провел самостоятельное исследование, получил новые теоретические результаты, разработал новые комплексы программ по численному моделированию и обработке больших объемов наблюдательных данных по солнечной активности, с применением этих методов получил результаты относительно характера солнечной магнитной активности. За время выполнения диссертационной работы Илларионов Е.А. проявил себя как компетентный исследователь, способный заниматься самостоятельной научно-исследовательской деятельностью.

**Достоверность** представленных результатов основана на:

1) публикации в ведущих российских и международных журналах по солнечной физике, журналах, входящих в перечень ВАК;

2) представлении и обсуждении результатов работы на международных, всероссийских конференциях (COSPAR, Space Climate Symposium, SCOSTEP, Физика плазмы в солнечной системе, Солнечная и солнечно-земная физика и др.) и выступлениях на научных семинарах в ИЗМИРАН, ГАО РАН, МГУ;

3) соответствии полученных результатов с теоретическими ожиданиями, согласии с результатами расчетов, проведенными другими методами и независимыми коллективами авторов.

**Научная новизна.** В работе впервые удалось сопоставить оценки показателей роста поля Якоби, получаемые усреднением отдельных реализаций поля Якоби, с результатом вычисления по точной аналитической формуле. Для этого, чтобы воспользоваться этой формулой, необходимо знать, как утроена инвариантная мера, по которой будет проводиться интегрирование. Найти явно инвариантную меру можно лишь в ряде простейших задач, в остальных случаях решение представляется возможным получить лишь численно, однако и здесь решение упирается в целый ряд особенностей, затрудняющих использование стандартных численных схем. В диссертационной работе на примере модельного уравнения Якоби со случайным параметром кривизны впервые было получено численное решение для широкого класса распределений параметра кривизны и разобраны особенности, возникающие на этом пути. На основе инвариантной меры определены скорости роста поля Якоби и результаты сопоставлены с известными ранее оценками. Высокая степень согласия результатов подтверждает обоснованность расчета показателей роста методами генерации большого числа отдельных реализаций. Следует отметить, что данный факт не представляется очевидным заранее ввиду присутствия в системе эффекта перемежаемости, накладывающего определенные ограничения на подобный подход.

Рассмотрение модельного уравнения Якоби позволило распространить аппарат теории произведения случайных матриц для нахождения показателей роста в уравнении эволюции магнитного поля в случайном потоке. В работе удалось получить выражения для скорости роста магнитного поля и старших статистических моментов всех порядков в предположении, что поле скоростей является однородным и изотропным. Тем самым открывается новый подход и исследованию вопросов эволюции магнитного поля.

Результаты и выводы, полученные на ходе обработки наблюдательных данных по солнечной активности, представляют собой новые сведения и значительно обогащают представление о режимах работы солнечного динамо. Предложенные методы статистической обработки позволяют получать значимые оценки параметров в условиях зашумленных и неполных данных. Среди основных положений можно выделить следующие: 1) впервые была предложена методика алгоритмического разделения волн активности на солнечных баттерфляй-диаграммах, метод позволил выделить циклы и волны активности по современным и историческим наблюдениям солнечных пятен; 2) построены широтно-временные диаграммы распределения тилт-угла биполярных областей, изучена связь с интенсивностью солнечных циклов; 3) обнаружено различие большой и малых биполярных областей по широкому спектру свойств.

**Практическая значимость** диссертации определяется как самими методами, разработанными в ходе работы и применимыми к исследованию более широкого круга задач, так и выводами, сделанными на основе применения этих методов.

Комплекс программ, реализующих алгоритм нахождения инвариантной меры для модельного уравнения Якоби, позволяет исследовать скорость роста поля в зависимости от типа распределения параметра кривизны. Представляет интерес развитие этих методов для более сложных систем уравнений, в которых также встает вопрос о близости оценок, получаемых методами типа Монте-Карло.

Методики выделения границ волн активности на солнечных баттерфляй-диаграммах, основанные на применении алгоритмов кластерного анализа, по сути являются универсальными и могут быть применены для работы с объектами произвольного типа, что представляет несомненный интерес, в частности, для автоматизации процедур обработки солнечных данных.

Цикл работ по изучению статистики биполярных областей на Солнце заставляет по-новому взглянуть на проблему малых активных и пересмотреть их вклад в процессы генерации магнитных полей. Объем накопленных данных с высоким разрешением позволяет приступить к изучению этого вопроса, однако для этого требуются более чувствительные и одновременно устойчивые к шуму методы обработки данных.

**Специальность**, которой соответствует диссертация Илларионова Е.А. «Количественные показатели эволюции магнитных полей на Солнце» соответствует специальности 01.03.03 — «Физика Солнца», физико-математические науки. Содержание и результаты работы соответствуют паспорту специальности по пунктам:

1. Солнечная активность и циклы солнечной активности на различных временных масштабах — методами кластерного анализа выделены волны активности на солнечных баттерфляй-диаграммах по современным и историческим данным, даны оценки скорости миграции пятен в цикле, обнаружен цикл с особой структурой.

2. Образования в солнечной атмосфере — получена статистика распределения тилт-угла биполярных областей на Солнце, изучена взаимосвязь параметров активных областей, обнаружено различие поведения тилт-угла больших и малых областей.

3. Магнитные поля и активные явления — предложена методика расчета показателей Ляпунова и скоростей роста старших статистических моментов магнитного поля в случайном потоке на основе решения задачи о росте нормы произведения случайных матриц.

**Основные результаты** диссертации, выносимые на защиту, изложены в 11 печатных работах, из них 4 индексируются базой данных ISI Web of Science (в том числе 1 – в высокорейтинговом журнале), 2 публикации в журналах из списка ВАК. Общий объем опубликованных работ — 81 страница. Наиболее значимые работы:

1. Tlatov A. G., Illarionov E. A., Sokoloff D. D., Pipin V. V. A new dynamo pattern revealed by the tilt angle of bipolar sunspot groups // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2013. Vol. 432. Issue 4. P. 2975–2984.

2. Illarionov E., Tlatov A., Sokoloff D. The properties of the tilts of bipolar solar regions // Solar Physics. 2015. Vol. 290. Issue 2. P. 351–361.

3. Illarionov E., Sokoloff D., Arlt R., Khlystova A. Cluster analysis for pattern recognition in solar butterfly diagrams // Astronomische Nachrichten. 2011. Vol. 332. P. 590–596.

4. Sokoloff D., Illarionov E. Intermittency and random matrices // Journal of Plasma Physics. 2015. Vol. 81. N. 4, P. 1–13.

Диссертация «Количественные показатели эволюции магнитных полей на Солнце» Илларионова Егор Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 — «Физика Солнца». Диссертация к защите представляется впервые.

Заключение принято на заседании кафедры теории вероятностей механико-математического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Присутствовало на заседании — 30 чел. Результаты голосования: «за» — 30 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел. Протокол № 5 от «26» октября 2016 г.

Заместитель заведующего кафедрой  
теории вероятностей,  
д.ф.-м.н., доцент

 Д.А. Шабанов

Ученый секретарь кафедры,  
к.ф.-м.н., ассистент



Е.М. Ряднова