

УТВЕРЖДАЮ



Директор ФГБУН

Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения РАН,
член-корреспондент РАН

 А. П. Потехин

« » декабря 2016 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертации Егора Александровича Илларионова
«Количественные показатели эволюции магнитных полей на Солнце»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.03 – физика Солнца

Диссертационная работа Е.А. Илларионова посвящена исследованию некоторых аспектов важной проблемы физики Солнца - циклических вариаций солнечной активности, проявляемых в изменениях характеристик поверхностных магнитных полей различных пространственных масштабов, обусловленных, по-видимому, сложными динамо-механизмами. При этом диссертация имеет комплексный характер, сочетая детальный анализ огромного эмпирического материала по различным источникам данных, на основе которых получены новые интересные результаты о свойствах магнитных полей на Солнце, с рассмотрением сложных самостоятельных математических задач, которые, тем ни менее, имеют прямое отношение не только к природе солнечных магнитных полей, но и к ряду других астрофизических явлений. Именно наличие математических разделов диссертации делает её в положительном смысле несколько особой, отличающейся от большинства других работ по физике Солнца, где, как правило, применение математики сводится к статистике или к решению ограниченных физических задач и процессов. Но, как известно, именно на стыке наук происходят наиболее интересные события и получаются важные результаты. Хорошим примером работ такого класса и является данная диссертация.

Более конкретно, в диссертации изучены количественные показатели, характеризующие эволюцию магнитных полей Солнца., представлены разработанные автором методы оценки скорости роста магнитного поля и

старших статистических моментов в однородном и изотропном поле скоростей, выполнены оценки характеристик биполярных активных областей в цикле солнечной активности, методами кластерного анализа изучена широтно-временная структура солнечных циклов. Применение методов, в том числе разработанных лично автором, позволило количественно оценить величину альфа-эффекта по суммарному вкладу активных областей в полоидальную компоненту магнитного поля Солнца.

Многие из известных соотношений в физике Солнца имеют характер статистических закономерностей с высоким уровнем шумов. В этих условиях важно корректно применять статистические методы и получать устойчивые количественные оценки нужных параметров. Особенно важно получать адекватные оценки характеристик магнитных полей в условиях их сильно выраженной структуризации, которая изменяется в ходе 11- и 22-летнего циклов активности. Развитие теории генерации магнитных полей также требует надежных алгоритмов для оценки альфа-эффекта по суммарному вкладу активных областей. Такого рода оценки позволят сопоставить результаты прямых наблюдений с выводами теории динамо. В диссертационной работе Е.А. Илларионова разработаны алгоритмы для решения таких задач и получены количественные оценки, полезные для изучения эволюции магнитных полей. Поэтому актуальность данной работы не вызывает сомнений.

Представленная диссертация состоит из введения, обзорной главы, в которой представлено современное состояние проблемы изучения магнитных полей Солнца, трех глав с результатами оригинальных исследований автора, заключения, и списка литературы. Диссертация изложена на 125 страницах, содержит 47 рисунков и 11 таблиц. Список литературы включает 95 наименований.

Во **Введении** (Глава 1) обосновывается актуальность работы, обсуждаются цели и задачи исследования, его научная и практическая значимость и новизна, перечисляются вынесенные на защиту положения. Отмечается, что основные результаты диссертации опубликованы в 11 статьях в международных и российских научных журналах (список таких работ приводится отдельно только в автореферате), из которых 2 входят в перечень ВАК для публикации материалов диссертаций по физике Солнца, 4 индексируется базой данных Web of Science. Убедительно показано, что результаты работы прошли надлежащую апробацию, поскольку докладывались на многочисленных российских и международных научных конференциях, тематика которых касалась как физики Солнца, так и астрофизики, физики плазмы, математики, механики сплошных сред. Указано, что в выполненных на суперкомпьютере СКИФ МГУ «Чебышев» вычислениях использовалось самое современное программное обеспечение. Хотя 10 из 11 публикаций по тематике диссертации являются совместными,

на защиту вынесены только те результаты, которые получены непосредственно автором.

Во **второй главе** («Современное Состояние Проблемы Изучения Солнечных Магнитных Полей», с. 14-32), достаточно подробно излагаются исторические предпосылки, послужившие мотивацией работ автора по тематике диссертации., в частности обнаружение тесной связи задачи эволюции магнитных полей Солнца с задачами изучения поведения средних характеристик векторных физических полей в случайных средах. Для введения в вероятностные методы, используемые в диссертации, рассмотрена впервые предложенная в 1964 Я.Б.Зельдовичем задача о геофизической в пространстве со случайным параметром кривизны. А именно, случайная среда оказывается удобной моделью описания систем с развитой турбулентностью, в ней обнаруживаются элементы порядка и специфические структуры, которые обладают удивительными свойствами. Одно из таких свойств — явление перемежаемости, состоящее в том, что в среде образуются локальные участки, в которых переносимое средой поле существенно усиливается (аналог на Солнце — пятна). Для математического исследования таких процессов использован специальный инструментарий включающий теорию произведения случайных матриц (определяются показатели роста Ляпунова векторных полей), цепи Маркова и теорему Ферстерберга. При этом для практических приложений необходим трудоемкий численный расчет, в диссертации использованный для изучения уравнения Якоби со случайным параметром кривизны, на котором воспроизводятся основные свойства явления перемежаемости. Отмечается, что аналогичная задача возникает при изучении обусловленной механизмами динамо (дифференциальное вращение, альфа-эффект) эволюции солнечных магнитных полей.

Кратко приводятся сведения об истории изучения солнечного магнетизма, в частности, солнечных пятен начиная с 17 века, когда наблюдения (наиболее скрупулезно Швабе и Штаудахером) велись на любительском с современной точки зрения — велись просто зарисовки пятен на диске. Важность таких записей состоит в расширении массива данных для исследования некоторых характеристик циклов активности. Согласно закону Шперера, средняя широта пятнообразования меняется с фазой цикла активности — она максимальна в начале цикла (около 45 градусов), затем смещается к более низким широтам и в конце цикла достигает приэкваториальных широт около 10 градусов. Особенно наглядно закон Шперера иллюстрируется диаграммами Маундера. После открытия эффекта Зеемана появилась возможность количественного анализа магнитных полей в солнечных пятнах и был обнаружен закон Хэйла — изменение с 22-летним периодом полярности ведущих пятен в биполярных группах (последние исследования показывают, что 5-7 процентов групп «нарушают» данный закон). Кроме того, в 1919 г. был открыт другой фундаментальный закон

солнечной цикличности — закон Джоя, согласно которому ведущие пятна биполярных групп образуются ближе к экватору, чем хвостовые пятна. Причем наклон оси таких групп, тилт-угол, заметно уменьшается при приближении к экватору (как \sin гелиографической широты). Отмечается, что закон Джоя был установлен по наблюдениям крупных активных областей, поэтому актуальным является его проверка с использованием нового наблюдательного материала, в изобилии поставляемого современными магнитографами наземного и космического базирования.

Третья глава («Рост Векторных Полей в Терминах Произведения Случайных Матриц», с. 33- 63), имеет сугубо математический характер и посвящена приложению теорем о росте нормы произведения случайных матриц к задачам о вычислении показателей роста векторных полей, задаваемых системами дифференциальных уравнений со случайными коэффициентами. В методе, используемом диссертантом, случайный процесс представляется как произведение одинаково распределенных случайных матриц. Поскольку в явном аналитическом виде решение поставленных задач возможно только для простейших случаев, не имеющих практического значения, основные актуальные результаты данной главы получены в результате трудоемких численных расчетов с помощью суперкомпьютера СКИФ МГУ. Практическим приложением полученных формул является их применение к задаче об эволюции магнитного поля Солнца в однородном изотропном поле скоростей. Показано, что при отсутствии магнитной диффузии показатель Ляпунова определяется простым соотношением, а моменты старшего порядка растут прогрессивным образом, что как раз и характерно для явления перемежаемости. Получен нетривиальный результат, что при заданном однородном характере распределения случайного параметра кривизны, стационарное распределение вероятностной меры существенно отличается от нормального. Отмечается, что для апробирования полученных решений необходимо использование наблюдательных данных, что и сделано в последующих двух главах диссертации.

В частности, в **четвертой главе** («Магнитное поле в цикле солнечной активности», с.64-81), методами кластерного анализа изучаются некоторые характеристики имеющихся к настоящему времени данных о солнечных циклах, в том числе первых четырех, основанных на зарисовках немецкого наблюдателя Штаудахера в 1749-1797 гг. -Для выделения циклов (поскольку существует неопределенность в некоторых понятиях, например, что считать началом или концом цикла), предложен метод кластерного выделения циклов и волн активности на баттейрфляй-диаграммах. Метод игнорирует полярность пятен и опирается исключительно на информацию о положении пятен. В результате применения кластерного анализа удалось (за исключением первого цикла) разделить циклы активности и выделить по две волны в каждом. Определены значения скорости миграции пятен в циклах

для современного периода (1874-2010 гг.), что представляет интерес для определения интенсивности циклов. Данные результаты позволяют характеризовать эволюцию тороидальной компоненты крупномасштабного магнитного поля, в то время как для изучения ответственной за альфа эффект полоидальной компоненты в диссертации анализируются циклические вариации углов наклона биполярных областей (тилт-углов) различных размеров. Такой анализ является основной частью следующей, пятой главы диссертации.

В **пятой главе** («Генерация Магнитного Поля в Цикле Солнечной Активности», с. 82 - 109) рассматриваются актуальные с точки зрения альфа-эффекта теории солнечного динамо экспериментальные (использованы в основном магнитограммы инструментов SOHO/MDI и SDO/HMI, вакуумного солнечного телескопа обсерватории Китт Пик) данные по биполярным структурам. Анализируются также случаи нарушения правила полярности Хэйла.

Приведено описание усовершенствованной методики выделения биполярных структур на магнитограммах, что позволило существенно расширить диапазон размеров вовлеченных в анализ областей. Показано, что новые данные по крупным областям (площадью более 300 м.д.п.), согласуются с законом Джоя, однако для областей меньшего размера тилт-угол хотя и сохраняет тенденцию к росту абсолютного значения с широтой, но противоположен по знаку. Это принципиально новый результат и для его интерпретации выдвинута гипотеза, что малые биполи связаны с полоидальной компонентой магнитного поля Солнца, а большие — с тороидальной. Из анализа данных за 3 цикла активности сделан дискуссионный вывод об отсутствии выраженной зависимости величины тилт-угла больших биполей от интенсивности цикла. Приведены результаты исследования связи тилт-угла с магнитным потоком и размерами биполей и показано существование различий в зависимости от того, к какой группе данные относятся, с размерами более 300 м.д.п, или менее.

В **Заключении** (с. 110-116) сформулированы основные итоги диссертационной работы: (1) получена плотность распределения инвариантной меры для модельного уравнения Якоби и на ее основе получены оценки скорости роста поля Якоби; (2) найдены оценки скорости роста магнитного поля и старших статистических моментов в однородном изотропном поле скоростей; (3) определены характеристики циклов и волн активности по современным и архивным данным на основе алгоритмической процедуры выделения структур на баттерфляй диаграммах; (4) Представлено широтно-временное распределение тилт-угла биполярных областей на Солнце, обнаружены различия свойств больших и малых биполярных областей, получена оценка величины альфа-эффекта.

Необходимо сделать следующие замечания по существу работы.

1. Во второй главе использован мощный математический аппарат, однако физические пределы его применимости освящены достаточно слабо. Например, следовало бы обсудить, насколько применяемое коротко-коррелированное приближение выполняется в астрофизических условиях, чем оно отличается от других приближений теории турбулентности.

2. В третьей главе практически отсутствует обсуждение возможных приложений важных полученных математических результатов. В частности, в контексте тематики диссертации имело смысл обсудить возможные приложения полученного уравнения 3.49.

3. В главе 3 алгоритмы кластерного анализа применены для выделения границ широтно-временных распределений солнечных пятен и были оценены скорости дрейфа зон пятнообразования отдельно для северного и южного полушарий в циклах 12-22. Полученные оценки скоростей дрейфа дают возможность сделать выводы о свойствах меридиональных течений в подфотосферных слоях. К сожалению, на основе этой информации никаких физических выводов не было сделано.

4. В главе 4 (раздел 5) на основании того, что использованная методика кластерного анализа не показала существования двух волн активности для цикла 1, а весь цикл целиком объединен в один кластер, сделан далеко идущий вывод о существовании в это время особой, квадрупольной, конфигурации крупномасштабного магнитного поля Солнца. Однако, такой вывод представляется необоснованным, слабо аргументированным, не подкреплённым независимыми данными. Более естественным представляется объяснить полученный результат техническими особенностями получения таких архивных данных, недостаточной статистикой.

5. В главе 5 отмечается, что одним из ключевых элементов теории солнечного динамо является количественная оценка альфа-эффекта по наблюдениям наклонов активных областей. При этом были получены соотношения между углами наклона и площадями групп пятен, оценены изменения средних углов наклона в разных циклах и др. Эти результаты дополняют ранее установленные закономерности, иногда выявляя существенные различия между подходами разных авторов. В целом же получается сложная, иногда противоречивая картина. Поэтому важно было бы оценить надежность применяемых в диссертации методов анализа, применить, возможно другие методы статистики. Желательно также было бы использовать дополнительную независимую информацию из мировых центров данных, в частности, каталога DPD Дебреценской обсерватории.

Хотя диссертация в целом хорошо оформлена, написана хорошим научным языком, тем ни менее она не свободна от некоторых недостатков, а в тексте имеются ошибки и опечатки. Перечислим некоторые из них, основные:

1. Уже на первой странице, во введении, дается ссылка на работы А.Н.Колмогорова [22-25]. Однако в списке литературы под номером [23] находится работа Казанцева А.П. Эта же оплошность повторена на стр. 15.

2. На стр. 29 фразу «возник серьёзный вопрос о том, что является проявление альфа-эффекта т как его можно оценить из наблюдательных данных», более корректно сформулировать следующим образом: «Возник серьёзный вопрос как оценить проявления альфа-эффекта по наблюдательным данным»

3. На стр. 76 при обсуждении рис. 4.9 упоминаются правая и левая панели. Однако на данном рисунке представлены панели верхняя и нижняя.

4. На стр. 85 упоминается термин «проективными эффектами», но более правильно представляется использовать «проекционными эффектами».

5. На стр. 86 вместо некорректного в данном случае термина «уровень размытия изображения» следует использовать «пространственное разрешение». На той же стр. «кусков»? Может быть, все же «фрагментов»?

6. Рис. 5.2 на стр. 88. в подписи фраза «Учитываются только области максимальным значением поля...». Пропущено «с», и, наверное, все же «с минимальным значением»?

7. На рис. 91 в подписи рис. 5.3 пропущена вторая координата.

8. В подписи рис. 5.9 говорится о красной линии, но в ИСЗФ СО РАН предоставлен только черно-белый вариант диссертации.

Из довольно многочисленных опечаток приведу наиболее курьёзные: (стр. 21) - «вилять», вместо «влиять»: (стр. 90) «титл-угол», вместо «тилт-угол».

При структурировании диссертации нумерация глав начинается с введения (соответственно и заключение — это глава 6), хотя более привычным представляется вынесение введения и заключения в отдельные независимые разделы.

Перечисленные замечания ни в коей мере не меняют общего весьма положительного впечатления от диссертации Е.А. Илларионова. Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание. Все вынесенные на защиту положения опубликованы в ведущих изданиях, в том числе международных, неоднократно докладывались Е.А. Илларионовым на научных конференциях и хорошо известны специалистам по физике Солнца. Результаты диссертационной работы Е.А. Илларионова могут быть использованы в научных организациях, проводящих исследования по солнечной и солнечно-земной физике, в частности, в Главной (Пулковской) астрономической обсерватории, в Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, в Крымской астрономической обсерватории, ФИАН, ГАИШ МГУ, НИРФИ и других. Работа была доложена

Илларионовым Е.А. на семинаре отдела физики Солнца ИСЗФ СО РАН, обсуждена и одобрена.

Диссертационная работа Е.А. Илларионова «Количественные показатели эволюции магнитных полей на Солнце» представляет законченное исследование, которое можно квалифицировать как научное достижение, важное для физики Солнца. Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Егор Александрович Илларионов, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – Физика Солнца.

Отзыв составил:

Заместитель директора по научной работе,
д.ф.-м.н., специальность 01.03.03 Физика Солнца
Институт солнечно-земной физики СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а,
тел.: (3952) 564536, e-mail: demid@iszf.irk.ru



М.Л. Демидов

Отзыв утвержден на семинаре отдела физики Солнца
ИСЗФ СО РАН
8 декабря 2016 г., протокол № 9
Секретарь семинара, к.ф.-м.н



И.П. Турова

Отзыв утвержден на заседании ученого совета
ИСЗФ СО РАН
23 декабря 2016 г., протокол № 11
Ученый секретарь ИСЗФ СО РАН,
к.ф.-м.н.



И.И. Салахутдинова