

Отзыв

официального оппонента, в.н.с. ФГБУН КрАО РАН, к.ф.-м.н. Абраменко Валентины Изосимовны на диссертационную работу Илларионова Егора Александровича «Количественные показатели эволюции магнитных полей на Солнце», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – Физика Солнца

В современной физике Солнца имеется ряд вопросов, настоятельно требующих ответа в связи с проблемой солнечной активности: как происходит генерация магнитных полей и как энергия магнитного поля реализуется в многообразии нестационарных процессов на поверхности Солнца и в гелиосфере. Решению первой задачи (а опосредованно, и второй) и посвящена предлагаемая нашему вниманию диссертационная работа.

Генерация магнитных полей и солнечной цикличности рассматривается в основном в двух аспектах: либо качественный анализ наблюдательных (в том числе исторических) данных о вариациях солнечной активности, либо численное решение магнитогидродинамических задач, описывающих эволюцию магнитного поля. И тот и другой подходы близки к состоянию насыщения, когда получение сколько-нибудь ценных результатов достигается неоправданно высоким уровнем затрат. Очевидно, что необходимы новые подходы, основанные, во-первых, на теоретическом прорыве в понимании процессов усиления магнитных полей, на привлечении новых математических теорий и методов, и во-вторых, на разработке строгих количественных оценок наблюдаемых проявлений эволюции магнитного поля. Предложенная диссертационная работа замечательным образом сфокусирована на развитии этих подходов, чем и объясняется **высокая степень ее актуальности.**

Стоит особо подчеркнуть, что в диссертационной работе нашли свое продолжение и развитие идеи Я.Б.Зельдовича и его школы о перемежаемом характере магнитных полей, о важной роли поведения высоких статистических моментов поля, о неизбежном усилении магнитного поля турбулентным потоком в проводящей среде. Позиция А.П.Казанцева и Я.Б.Зельдовича о необходимости базировать изучение роста магнитных полей на строгой математической основе и теоретических разработках, слегка забытая в современный век суперкомпьютеров, обрела поддержку в данной диссертационной работе. Более того, диссертантом задача ставится более широко, чем просто объяснение роста магнитного поля в замагниченной турбулентной плазме. Он исследует рост векторных полей в случайных средах. В такой постановке результаты работы могут быть применены и в других областях естествознания.

Общая характеристика работы

Представленная диссертация состоит из введения, четырех глав, 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, область применения результатов, личный вклад автора. Перечисляются вынесенные на защиту положения, а также список конференций, на которых результаты работы прошли апробацию.

В **Главе 2** обсуждается современное состояние проблемы исследования магнитных полей на Солнце и приводится общая концепция диссертационной работы. Обсуждается специфика изучения случайных сред, роль случайных флуктуаций и их способность оказывать ненулевое результирующее действие, суть явления перемежаемости, которая состоит в том, что случайные течения жидкости способны приводить к возникновению локальных участков, в которых переносимые ею векторные поля многократно усиливаются. Диссертант предлагает изучать рост векторных полей в рамках математической теории Ферстенберга, предложенной в 60-е годы прошлого века и основанной на построении нормы произведения независимых случайных матриц и изучении показателя роста нормы. Разработанный метод получения оценок скорости роста векторных полей диссертант переносит на задачу описания эволюции магнитного поля в потоке проводящей жидкости и далее переходит к получению количественных оценок эволюции магнитных полей на Солнце, вычисленных по разработанным в диссертации алгоритмическим методам на основе данных наблюдений.

Глава 3 – это профессиональное законченное математическое исследование, которое, вероятно, само по себе могло бы стать основой для кандидатской диссертации. Дана математическая постановка задачи о росте векторных полей в случайных средах. Обсуждается выражение для показателя Ляпунова (показатель скорости роста нормы произведения случайных матриц) в общем виде, а затем ставится и решается задача о получении показателя Ляпунова для модельного уравнения Якоби со случайным параметром кривизны. Автором предложена процедура численного определения инвариантной меры как стационарного распределения для цепи Маркова, порождаемой действием случайных матриц на единичные векторы. Расчет переходной плотности цепи Маркова осуществлялся с помощью суперкомпьютера СКИФ МГУ. Численное интегрирование по инвариантной мере позволило диссертанту найти значение показателя Ляпунова, характеризующего скорость роста поля Якоби. В заключительном разделе Главы 2 получено выражение для показателей скорости роста старших статистических моментов в задаче об эволюции магнитного поля с однородным изотропным полем скоростей.

В **Главе 4** обсуждаются наиболее яркие наблюдаемые проявления 11-летнего цикла солнечной активности, а именно, распределение пятен по поверхности Солнца в виде бабочек Маундера на широтно-временной диаграмме. Феномен цикличности появления солнечных пятен – один из основных объектов изучения теории солнечного динамо, и поиски формализации в описании распределения пятен весьма актуальны в целях минимизации субъективных факторов в оценках основных параметров солнечной цикличности, а также в целях унифицированного использования исторических данных. Диссертантом освоены современные методы кластерного анализа двумерных структур (так называемые DBSCAN и C-means методы), разработано применение этих методов к широтно-временным диаграммам распределений пятен. Большое внимание уделено устойчивости работы метода при изменении качества измерений. Диссертантом получены

убедительные результаты по очерчиванию бабочек-диаграмм для 21-го и 22-го циклов солнечной активности. Наиболее важной, на мой взгляд, является возможность анализировать исторические данные, для которых нет информации о знаке магнитного поля в пятнах, а есть лишь данные о положении пятен на диске, да и то не всех. Предложенный автором метод не зависит от полярности магнитного поля и применим, как показано в работе, к ограниченным выборкам. Автору удалось проанализировать циклы 1 и 2 (1757 – 1776 годы) и показать, что первый цикл обладал особой конфигурацией магнитного поля, более близкой к квадрупольной, нежели к классической дипольной. Такой вывод свидетельствует о неоднородностях динамо-процесса на длинных временных масштабах, что само по себе очень важно для дальнейших разработок теории динамо. Диссертант также получил оценку скорости миграции тороидальной компоненты крупномасштабного магнитного поля Солнца для 11 циклов солнечной активности (1879 – 1996 гг.). Оценка не зависит от визуального восприятия бабочек Маундера, а получена на основе воспроизводимого алгоритмического процесса.

Глава 5, с моей точки зрения, является наиболее значимой и в плане практического применения разработанных автором методов к наблюдательным данным, и в плане диагностики динамо. Диссертантом разработан алгоритмический метод и представлена обоснованная оценка доли тороидального потока, переходящей в полоидальный поток за счет альфа-эффекта. Чтобы оценить смелость этой попытки, стоит напомнить, что процесс перехода от тороидального к полоидальному полю в процессе динамо-цикла был с самого начала (и во многом остается и по сей день) самым тонким и ключевым вопросом теории динамо. Диссертант идет по пути статистического анализа угла наклона магнитного биполя к экватору, так называемый тилт-угол. Он опирается на опубликованные ранее (в 2010-2012 гг.) методы определения тилт-угла, и при этом обобщает их на строго математической основе с подробным описанием процедуры, позволяя, таким образом, воспроизвести результаты, а также применить метод в будущем для новых данных. Диссертантом выявлено различие в поведении больших и малых биполей с точки зрения их преимущественной ориентации относительно экватора, установлена граница раздела на большие и малые биполи. Полученный диссертантом результат находится в хорошем согласии с предыдущими исследованиями (Platov et al., 20120) и позволяет по-новому взглянуть на роль малых биполей в солнечном динамо, так как существенная часть общего магнитного потока Солнца связана именно с малыми магнитными элементами.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации и дана краткая интерпретация каждому положению, выносимому на защиту.

Вошедшие в диссертацию Е.А. Илларионава результаты имеют большое значение для физики Солнца и солнечно-земных связей. Солнечный цикл является важнейшим проявлением магнитной активности Солнца и во многом определяет условия в околоземном космическом пространстве. Полученные в диссертационной работе результаты имеют значимый потенциал перевести методы изучения солнечного цикла из разряда качественных (а зачастую и визуальных) оценок в разряд количественных (алгоритмических) исследований, базирующихся на строгой математической платформе. Все это определяет **научную и практическую значимость** диссертации.

Диссертационная работа уникальна в том плане, что она объединяет теоретическое математическое исследование, численное моделирование с привлечением супер-компьютера и анализ данных наблюдений. При этом все три направления представлены на высоком профессиональном уровне.

Тем не менее, имеются следующие замечания.

1. Введение весовых коэффициентов при вычислении среднего тилт-угла недостаточно обосновано (Гл.5.3). Почему только большие биполи учитываются с весом, а многочисленные малые входят в статистические оценки без весов? Почему именно площадь, а не поток, например, берутся в качестве весового коэффициента?

2. Процедура вычисления тилт-угла, и особенно его знака, четко не сформулирована. Определение на стр. 83 явно не достаточно, т.к. не дает информации о знаке («Тилт-угол определяется как величина угла наклона биполярной области к солнечному экватору»). Другое определение (стр. 89, «мы называем тилт-угол положительным, если вращение происходит по часовой стрелке, и отрицательным, если против часовой стрелки, без учета полушария») дает информацию о знаке, но не идентифицирует объект вращения как вектор. Кроме того, сам процесс вращения остается за рамками определения: ведь наблюдается неподвижный биполь на магнитограмме и есть только направление экватора, ничего не вращается, а вращение – лишь исследовательский прием. Конечно, основные выводы диссертации от этого не страдают, но схематический рисунок углов значительно облегчил бы восприятие.

3. При описании рисунка 5.4 сказано (стр. 90): «Для построения использовались биполи с магнитным потоком, превосходящим $B_{min}=10$ Гаусс ». Очевидно, имелась ввиду напряженность магнитного поля, но не поток, который измеряется в максвеллах. Кроме того, не объяснен смысл B_{min} . Полагаю, что это среднее (либо максимальное) по площади биполя значение напряженности магнитного поля без учета полярности.

4. Неудачно и скупо введена в рассмотрение величина альфа на стр. 99. Здесь этот параметр встречается впервые не в феноменологическом смысле (как альфа-эффект), а в числовом. И стоило бы уделить ей больше внимания и сравнить с предыдущими ее оценками, если таковые имеются. Это замечание относится и к утверждению на стр. 115: «... полученная нами количественная оценка альфа как интегрального вклада по отдельным биполям хорошо согласуется со стандартными представлениями о порядке этой величины.»

5. Досадный недостаток оформления работы – цветовая кодировка рисунков, присутствующая в тексте, но, к сожалению, отсутствующая на самих рисунках.

Перечисленные замечания ни в коей мере не затрагивают основные защищаемые положения и не снижают их большой научной и практической значимости. Диссертация написана ясно и четко. Автореферат правильно отражает ее содержание. Все вынесенные на защиту положения опубликованы в ведущих международных изданиях, докладывались диссертантом на научных конференциях. Результаты диссертационной работы Илларионова Е.А. 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 астрофизической обсерватории РАН и других.

Подводя итог, можно сказать, что диссертационная работа Илларионова Е.А. «Количественные показатели эволюции магнитных полей на Солнце» представляет законченное исследование и удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Илларионов Егор Александрович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – физика Солнца.

Официальный оппонент,

Ведущий научный сотрудник ФГБУН КрАО РАН, к.ф.-м.н.

В.И.Абраменко

13.12.2016 г

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Крымская астрофизическая обсерватория РАН, 298409, Республика Крым, пгт. Научный, тел. +7(978)7571938 e-mail: vabramenko@gmail.com

Подпись В.И.Абраменко заверяю:

Директор ФГБУН КрАО РАН, к.ф.-м.н.



А.Н.Ростопчина-Шаховская

13.12.2016 г.

298409, Республика Крым, пгт. Научный, тел. +7 (978) 853 0843 e-mail: arost@craocrimea.ru