

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Главной (Пулковской)
астрономической обсерватории РАН
доктор физ.-мат. наук



Н.Р. Ихсанов

« 26 » 04 20 22 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН о диссертационной работе Шибаловой Антонины Сергеевны «Трассеры работы динамо в магнитных полях небесных тел», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – физика Солнца.

Магнитное поле – одна из основных характеристик, присущая подавляющему числу астрофизических объектов, и чуть более 100 лет эти поля астрономами изучаются. Ближайшими для нас космическими лабораториями являются Земля и Солнце. Факт существования магнитного поля Земли известен с исторических времен. Более 100 лет, начиная с открытия Дж. Хэйла, связавшего в 1908 г. расщепление линий в спектре солнечного пятна с эффектом Зеемана, мы знаем о магнитном поле на Солнце, которое, как оказалось, определяет динамику практически всех нестационарных явлений на нем. Чуть более полутора веков нам известно о циклическом характере появления солнечных пятен. Первые теоретические попытки объяснить эту магнитную цикличность появились в середине 20-го века. В настоящее время теория динамо широко развилась, благодаря усилиям не только астрофизиков, но и математиков. В 60-е годы Олин Вильсон начал систематически наблюдать изменения в хромосферных линиях H и K CaII у ряда звезд поздних спектральных классов. К настоящему времени звездные циклы также открыты, и теория динамо развивается и для них. Кроме прочего, сейчас мы знаем, что кроме регулярного динамо, у Солнца и звезд возможно и турбулентное динамо.

Как для успешного тестирования теоретических наработок, так и для выявления новых ключевых закономерностей нам необходимо успешно работать с наблюдательными данными, которые сейчас появляются благодаря длительному регулярному мониторингу, космическим миссиям и крупным наземным инструментам. Диссертация А.С. Шибаловой посвящена как раз этим направлениям, и ее название об этом свидетельствует.

Актуальность и новизна исследования достаточно полно отражены в диссертации и ее автореферате. Специально отмечу два момента. Экваториальная асимметрия солнечной активности на продолжительной временной шкале – один из самых ее «загадочных» параметров. Диссертант в своей работе прилагает усилия для прояснения ее изменений через рассмотрение двух основных пространственных гармоник магнитного поля Солнца, что может быть перспективным и разрабатывается не только автором работы. Другое: диссертант для анализа изменений квадрупольного магнитного момента Солнца со временем использовала тензорное исчисление – такой подход явно требует применения в будущих исследованиях. Новые результаты диссертации опубликованы в 9 статьях в ведущих журналах: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *Solar Physics*, *Астрономический журнал*, *Геомагнетизм и аэрономия*, *Физика Земли*. В трех из них А.С. Шибалова – первый соавтор.

Диссертация состоит из Введения, обзора современного состояния проблем, затронутых в работе, пяти глав изложения полученных результатов, заключения и списков литературы. Нумерация такова, что первой главой обозначено Введение, и только с третьей главы следует описание собственно результативной части. Поэтому в настоящем отзыве будем называть третью главу первой, четвертую – второй и т.д.

В первой главе применяется фрактальный подход и оценивается размерность Хаустдорфа для крупномасштабного магнитного поля Солнца. Терминологически: автор разделяет общее поле на крупномасштабное и мелкомасштабное. В то же время, часто в литературе «крупномасштабное» поле представляется как фоновое (поля открытых магнитных конфигураций) в отличие от локального (активные области). Вообще, в разных работах нет единых названий, и следовало бы как-то договориться. Но по мере изложения диссертантом вполне ясно, что именно она имеет в виду. Замечание: на рисунок 1 в тексте диссертации нет ссылки, автор, судя по названию рисунка, хотел проиллюстрировать нахождение размерности в билогарифмической системе координат. Автору следовало бы объяснить, как тогда согласуется наклон прямой на рис.1, равный 0.54, и приведенное в тексте как результат вычислений значение 0.3 (близкое к результатам других исследователей). Может быть, на рисунке приведена картина вблизи минимума, а 0.3 – это среднее по циклу значение?

Кроме того, у меня есть замечание самого общего характера, относящее не только к диссертации: по теореме Гаусса-Маркова метод наименьших квадратов для несмещенности оценок должен предполагать нулевой характер матожидания случайных отклонений (ошибок) от оцениваемого выражения. При логарифмировании наблюдаемых значений ординат это требование разрушается. Есть альтернатива: метод Левенберга-Марквардта, который позволяет аккуратно работать с нелинейными зависимостями. Применение этого метода к авторскому рисунку 1, кстати, дает несколько отличающееся значение 0.60 (а не 0.54).

Весьма примечательны рис. 2 и 3 диссертации, показывающие, как фрактальная размерность изменяется с уровнем активности и фазой цикла. Это действительно интересный результат. Для его интерпретации, хотя бы частичной, я бы обратил внимание на статью Nagovitsyn Yu., Pevtsov A. // *The Astrophysical Journal*, V.833 (2016) – Fig.5. Из этого рисунка в упоминаемой статье следует, что доля крупных групп пятен по отношению к их полному числу четко изменяется с фазой 11-летнего цикла, так что в минимуме относительно больше мелких групп, теряемых при усреднении по большей площади.

Во второй, самой большой по объему главе, которая имеет номер 4, автор изучает общее магнитное поле на основе временных изменений его низших мультигармоник – диполя и квадруполья. Эти компоненты вносят определяющий вклад в конфигурацию общего поля, и именно поэтому их рассмотрение имеет важное значение. Описание изменений напряженности дипольной и квадрупольной компонент произведено в течение 22-летнего цикла Хэйла. Дипольный момент рассматривается с точки зрения двух проекций: аксиальной и экваториальной. Интересным представляется вывод автора о возрастании вклада квадрупольной компоненты в общее поле в течение циклов 21-24. Интересно, что будет в текущем 25-м цикле, который пока показывает поведение, отличающееся от большинства предварительных прогнозов. Автор среди прочего, показала, что напряженность поля квадруполья и вариации его скорости имеют более выраженный циклический характер, чем у диполя. Было бы также интересно сравнить результаты автора с полученными в статье Virtanen I. et al. *Astronomy & Astrophysics*, V. 627, 2019. В конце главы автор вдумчиво суммирует полученные результаты, что важно для понимания всей картины вариаций диполя и квадруполья для рассмотренных циклов – а это принесет пользу при построении динамо-моделей.

В следующей главе проведено исследование северо-южной асимметрии пятнообразования (как я уже писал, одного из самых загадочных параметров солнечной активности), более точно – фазового сдвига между солнечными циклами для северного и южного полушарий Солнца. В качестве индексов солнечной активности использованы значения числа солнечных пятен и суммарной площади пятен. Как пишет автор, «источник – база данных Гринвичской обсерватории <https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>». Здесь следует сделать следующее замечание. На указанном адресе находится база данных Гринвичской обсерватории только до 1976 г. Дальнейшие же данные принадлежат ВВС США, проект сети телескопов SOON – как показано в ряде исследований, не самые лучшие данные. Правильнее было бы использовать материалы из работы Mandal S. et al., *A&A*, v. 640, 2020, которые по точности измерения площадей в 10 раз лучше. В то же время, ряд SOON применяется некоторыми исследователями, и диссертант здесь – не единственный пользователь. К тому же, надеюсь, что использование автором работы, главным образом, среднегодовых значений сгладило несовершенство ряда Д. Хатауэя – а данные именно этого ряда с середины

70-х годов 20 века де факто использовала автор – и мое единственное замечание здесь: не надо этот ряд называть Гринвичским. В результате своего исследования диссертант делает вывод, что (средний) фазовый сдвиг между циклами активности в северном и южном полушариях Солнца существенно отличается от эпизодов заметных отклонений от дипольной симметрии пространственного распределения солнечных пятен (таких как в Маундеровском минимуме). Для циклов с отставанием северного полушария величина сдвига составляет ~ 7 месяцев, при отставании южного полушария ~ 6 месяцев. Может быть, эти полученные данные внесут вклад в наше будущее понимание северо-южной асимметрии солнечной активности.

В следующей главе продолжается исследование квадрупольного магнитного момента. Гармоническое разложение второй главы дополнено тензорным описанием. Такой формализм, по мере ознакомления с диссертацией, не кажется искусственным, автор доказывает это, сравнивая полученные им данные с теорией динамо, а именно с моделью солнечного асимметричного динамо с супердиффузией. Основные черты обеих кривых на рис. 28 достаточно хорошо согласуются. В целом, кажется, что тензорный подход к задачам, решаемым диссертантом, и близким задачам перспективен.

В последней главе диссертант несколько отступает от солнечного магнетизма и приступает к исследованию магнетизма земного. Не вижу здесь нарушения внутреннего единства диссертации, ведь есть же направление «солнечно-звездные аналогии», а у диссертанта – солнечно-земные аналогии. Автор рассматривает палеомагнитные данные на очень длинной шкале: с начала Триаса Мезозойской эры (!). Основной инструмент – вейвлет-анализ, основы которого весьма кратко, но ёмко описаны диссертантом. Не очень понятно, почему на рис.29 МНАТ-вейвлету соответствует более узкий интегральный вейвлет-спектр, чем вейвлету Морле: МНАТ состоит, грубо говоря, из одного колебания минимум-максимум-минимум, а вейвлет Морле – из «гребенки», что должно сглаживать картину, но настаивать на своем вопросе без собственно временного ряда я не могу. Рассматривая несколько вариантов реконструкций палеомагнитной шкалы, автор выявляет периодическое поведение на временах порядка 50 млн. лет. Сравнение данных по использованной реконструкции с симуляцией достаточно простой модели динамо со случайным параметром показывает определенное сходство их поведения при рассмотрении на больших временах. Сделан вывод об отсутствии секулярного цикла в перемене полярности.

Автор диссертации, безусловно, заслуживает присуждения ей степени кандидата физико-математических наук на основании следующего.

О новизне диссертации сказано выше, практическая значимость, кроме фундаментального аспекта, может быть связана с тем, что понимание процессов солнечного магнетизма может продвинуть нас в прогнозах солнечной активности и, следовательно, в прогнозах неблагоприятных явлений космической погоды, влияющих на деятельность цивилизации.

Результаты, вынесенные на защиту, можно принять.

Оценивая работу А.С. Шибаловой «Трассеры работы динамо в магнитных полях небесных тел» в целом, хочу сказать, что она оставляет хорошее впечатление, высказанные замечания его не меняют – это уточнения, а не оспаривание результатов автора.

Работа соответствует специальности ВАК 01.03.03 – Физика Солнца. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Результаты, полученные в ней, могут быть использованы в целом ряде учреждений: ИКИ РАН, КраО, ГАО РАН, Физфаке МГУ, ГАИШ МГУ и др.

Отзыв составлен заместителем директора по научной работе ГАО РАН д.ф.-м.н. Ю.А. Наговицыным, заслушан и одобрен на объединенном семинаре научных подразделений ГАО РАН 26 апреля 2022 г.

Зам. директора ГАО РАН,
доктор физ.-мат.наук

25 апреля 2022 г.



Ю.А.Наговицын

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (астрономическая) обсерватория Российской академии наук.

196140 г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65, кор.1.

Тел.: 8-812-363-74-00, e-mail: map@gaoran.ru

www.gaoran.ru