

ОТЗЫВ  
официального оппонента на диссертационную работу  
Александра Алексеевича Непомнящих  
«Согласованная модель солнечного динамо и дифференциального вращения»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.03.03 – Физика Солнца

На сегодняшний день остается нерешенным вопрос об изменчивости солнечных циклов в пятнах и полярном поле по амплитуде и длительности вплоть до их почти полного исчезновения (гранд-минимумы). Теория объясняет эту модуляцию флуктуациями параметров динамо. Например, в работах [Karak and Choudhuri, *The Waldmeier effect and the flux transport solar dynamo*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, v. 410, pp. 1503–1512; Karak and Choudhuri, *Studies of grand minima in sunspot cycles by using a flux transport solar dynamo model*, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2013, v. 13, pp. 1339–1357] эффект Вальдмайера и минимум Маундера объясняются вариациями меридиональной циркуляции. Здесь, однако, немедленно возникает следующий вопрос, что вызывает вариации параметров динамо, включая из подавление, действительно ли все дело в случайных вариациях параметров? Если наблюдаемые вариации солнечной активности и полярного поля можно (до некоторой степени точности) воспроизвести через вариации почти каждого из управляющих параметров динамо [Jiang et al., *Can Surface Flux Transport Account for the Weak Polar Field in Cycle 23?* *Space Science Review*, 2013, v. 176, pp. 289-298], то как искать истинную причину модуляции солнечных циклов?

Не смотря на постепенно увеличивающийся банк наблюдательных данных, величины входных параметров модели иногда выбираются в угоду получения результата, объясняющего то или иное явление, без согласования входных параметров с их оценками, полученными из измерений. Примечательной в этом отношении стала работа Nandy, Munoz-Jaramillo, Martens [The unusual minimum of sunspot cycle 23 caused by meridional plasma flow variations, *Nature*, 2011, v. 471, pp. 80-82], в которой длительный глубокий минимум между циклами 23 и 24 и слабое полярное поле объясняются вариациями меридиональной скорости. При этом ни вариации, ни амплитуды данного параметра не согласуются с наблюдательными данными [Hathaway, Rightmire, *Variations in the Sun's meridional flow over a solar cycle*, *Science*, 2010, v. 327, pp. 1350-1352; Ullrich, *Solar Meridional Circulation from Doppler Shifts of the Fe I Line at 5250 Å as Measured by the 150-foot Solar Tower Telescope at the Mt. Wilson Observatory*, *The Astrophysical Journal*, 2010, v. 725, pp. 658-669].

Можно заключить, что проблема количественного рассогласования между солнечными наблюдательными данными и теоретическими моделями давно беспокоит специалистов в области физики Солнца, тем более, что с момента определения ключевых управляющих параметров прошло изрядное время. На мой взгляд, в работе сделано продвижение сразу в двух актуальных направлениях. Во-первых, модель ориентирована на приближение выходных параметров к данным наблюдений, а во-вторых неизмеримые на данные момент параметры задаются

посредством численного эксперимента, а не умозрительных заключений или предположений.

Диссертация состоит из введения и трех глав, посвященных (1) модели динамо с нелокальным альфа- и диамагнитным эффектами, которая согласована с моделями крупномасштабных течений и градиентом энтропии (2) исследованию воздействия флуктуаций альфа-эффекта на параметры солнечной цикличности, где относительная амплитуда флуктуаций регулируется случайной функцией времени и (3) применению разработанной модели к задаче звездного динамо. В заключении сформулированы основные результаты работы: (1) создана согласованная динамо-модель, (2) определено характерное время флуктуаций альфа-эффекта и его влияние на амплитуду солнечных циклов, предложено объяснение пониженной пятнообразовательной активности цикла 24, (3) показано как флуктуации альфа-эффекта влияют на длину циклов, (4) объяснено нарушение закона гирохронологии для звезд солнечного типа, прошедших более половины своего пути на главной последовательности. На защиту выносятся три положения: (1) разработанная динамо-модель, (2) оценка средней и максимальной амплитуд полной магнитной энергии в модели и механизмы перехода глобального динамо к глобальным минимумам и максимумам активности, (3) зависимость структуры крупномасштабных полей звезд от их цвета и оценка параметра альфа для максимальных периодов вращения и температуры немолодых звезд солнечного типа. Объем диссертации составляет 100 страниц, исследование опирается более чем на полсотни печатных научных работ. Результаты докладывались на российских конференциях и опубликованы в 6 научных статьях, входящих в базу данных Web of Science. Также отмечу, что в диссертации выдвинута интригующая идея о том, что вопреки распространенному утверждению, тахоклон, по-видимому, не важен для динамо, так как в нем мала радиальная составляющая полоидального поля и он располагается ниже дна конвективной зоны.

Важность описанных выше результатов говорит сама за себя. У меня осталось положительное и оптимистичное мнение о работе и ее будущем продолжении, а также возникли вопросы, которые хотелось бы задать в данном отзыве.

Для нижнего рисунка 1.8 указывается, что максимальные значения тороидального поля достигаются на низких широтах 10–15 градусов. Однако, анализ рисунка показывает, что центр плотности распределения (если я не ошибаюсь, и это действительно плотность распределения) находится на 5-ти градусах широты или даже ниже. Как разрешить данное рассогласование?

На рисунках 2.2(b) и 2.3(b) изображены изменения тороидального поля под действием вариаций альфа-эффекта, причем отклик начинается только на шестой год симуляции. На рисунках 2.2(c) и 2.3(c) изображена полная энергия того же тороидального поля, посчитанная по формуле 2.4. Сильные изменения полной энергии начинаются уже со второго года симуляции. Для меня осталось не ясным за счет чего происходит изменение магнитной энергии тороидального поля со второго по шестой год симуляции, если тороидальное поле остается неизменным.

Также в симуляциях используется отрицательная величина альфа-эффекта. Для модели Бэбкока-Лейтона это означает нарушение закона Джоя. Означает ли это, что

в случае альфа меньше нуля большинство групп пятен (с первого по третий год симуляции – рис. 2.2 и 2.3) в течение двух лет нарушают закон Джоя, так как время жизни солнечных пятен много меньше двух лет? Будет ли вклад в полярное поле от одной группы пятен, нарушающей закон Джоя, компенсирован вкладом такой же группы пятен, подчиняющейся закону Джоя? Если нет, то почему?

На рисунке 2.8 показан пример сильного цикла активности, длина которого составляет 18 лет (с 33-го по 51-й год симуляции). Реализует ли модель сильные циклы активности, длина которых составляет 10-11 лет?

Средняя длина фазы роста солнечных циклов, рассчитанная для циклов с первого по 23-й, по данным [Nathaway, The solar cycle, Living Review in Solar Physics, 2015, v. 12] составляет 4,2 года, средняя длина фазы спада – 6,8 лет. Разница превышает 2,5 года. Согласно модели, в среднем фаза роста длится 5,14 лет и фаза спада 5,80 лет (таблица 1). Для всех расчетных параметров модели разница средних длин фаз роста и спада менее года. В чем причина меньшей разницы в модели? Это относительно большое число циклов с фазой роста длиннее фазы спада (рис. 2.8, у двух из шести циклов фаза роста длиннее фазы спада) или причина в малом числе асимметричных циклов по сравнению с симметричными циклами?

На рисунках 2.8 и 2.10 нормированное альфа колеблется в среднем около нуля в течение 70 лет, а на рисунке 2.13 нормированное альфа лежит в основном выше нуля в течение 30 лет. В чем может крыться физическая причина таких долговременных колебаний альфа-эффекта?

В формуле 3.4 указывается, что дельта омега есть дифференциальное вращение (что именно, скорость?). На рисунке 3.1 указывается, что дельта омега есть разность угловых скоростей между экватором и полюсом на поверхности звезд. Какое из указанных определений верное для дельта омега?

Как и любая работа, она не может встретить исключительно положительный отклик у вовлеченных в проблематику специалистов. Иными словами, я бы хотела указать на следующие недостатки.

Поскольку представленная диссертация является плодом работы коллектива, то мне иногда было сложно отделить вклад диссертанта от вклада его коллег. Например, в разделе научная новизна указывается, что показана значимость диамагнитного эффекта неоднородной турбулентности для генерации тороидальных полей в модели динамо с нелокальным альфа-эффектом. Однако, в докторской диссертационной работе Сергея Владимировича Олемского в разделе научная новизна можно найти схожее утверждение. Данное сходство ни в коем случае не бросает тень на диссертанта и его коллег, но осложняет формальную оценку работы.

В работе используется большое количество параметров, при этом описание, что скрывается за тем или иным символом в формулах, иногда появляется лишь спустя несколько страниц или вовсе отсутствует.

Система единиц измерения неоднородна. Часть величин указана в единицах системы СГС, часть в системе СИ. На соседних строках радиус может быть указан в см, а параметр альфа в м/с. Коэффициент диффузии может быть указан в квадратных метрах ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ), а вязкость в квадратных сантиметрах ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ). Единицы измерений и подписи на графиках указаны как на русском, так и на английском языках. Данный недостаток, конечно, не осложняет понимание, но добавляет неряшливости к изложению материала.

На странице 12 приводится выражение для величины  $D(V^m)$ , которая входит в выражение для меридиональной циркуляции и учитывает вклад турбулентных вязкостей (вязкое сопротивление меридиональному течению). Со ссылкой на [Kitchatinov and Olemskoy, Alleviation of catastrophic quenching in solar dynamo model with nonlocal alpha-effect, *Astronomische Nachrichten*, 2011, v. 332, pp. 496-501] указывается, что явное выражение для  $D(V^m)$  довольно громоздко. При попытке ознакомиться с данной величиной обнаружилось, что в указанной работе ни вопрос о меридиональной циркуляции, ни вклад в нее турбулентных вязкостей не рассматривался. Прошу автора поправить меня, если я ошибаюсь.

В уравнении 1.3 пропущена скобка.

На странице 59 дана ссылка [Обридко и Наговицын, 2017], однако в списке литературы данный источник отсутствует. По всей видимости, имеется ввиду книга этих авторов «Солнечная активность, цикличность и методы прогноза», а отсутствие ссылки закралось при копировании текста из статьи [Кичатинов и Непомнящих, Асимметрия солнечных циклов как следствие флуктуаций параметров динамо, *Письма в Астрономический журнал*, 2018, т. 44, № 10, стр. 705-712].

Наконец, в защищаемые положения вынесена максимальная амплитуда магнитной энергии  $\sim 3 \cdot 10^{38}$  эрг, полученная в модели. Однако нигде в тексте данная величина не встречается и не обсуждается. Предполагаю, что эта цифра есть граница сетки на рисунке 2.5. Считаю данное упущение опасным недостатком работы, так как защищаемые положения есть важные новые результаты, которые должны быть обоснованы в теле диссертационной работы.

Указанные замечания не бросают тень на несомненные достоинства представленной диссертационной работы. Отдельно хочется отметить высокое качество изложения материала, грамотность и владение русским языком, отсутствие наукообразия и сложносочиненных оборотов, затрудняющих понимание.

Уверена, что результаты работы будут востребованы в исследованиях российских и зарубежных научных организаций, связанных с изучением физики Солнца и звезд.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Цели диссертации соответствуют полученным результатам, а эти результаты прошли апробацию на конференциях и разумно отражены в публикациях автора в научных изданиях, входящих в перечень рецензируемых журналов, утвержденных ВАК. Тема диссертации соответствует заявленной научной специальности.

Считаю, что представленная диссертация «Согласованная модель солнечного динамо и дифференциального вращения» удовлетворяет требованиям, предъявляемым в Положении о порядке присуждения ученых степеней, и предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Александр Алексеевич Непомнящих заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 — Физика Солнца.

Официальный оппонент:

Доцент Санкт-Петербургского государственного университета  
д.ф.-м.н. Надежда Валерьевна Золотова  
специальность 01.03.03 «Физика Солнца»  
15 августа 2019

Физический факультет

Санкт-Петербургского государственного университета,  
198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Ульяновская ул., д. 1.  
тел.: +7-905-213-19-42; e-mail: [n.zolotova@spbu.ru](mailto:n.zolotova@spbu.ru)

*Можно прислать*

*Золотова*  
*успехов*

ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА  
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ  
ГУОРП  
ОС СУВОРОВА



*2019*