

На правах рукописи

Шибалова Антонина Сергеевна

**Трассеры работы динамо
в магнитных полях небесных тел**

01.03.03 – физика Солнца

Автореферат на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва, 2022 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: Соколов Дмитрий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор Физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты:

Фрик Петр Готлобович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Физической гидродинамики Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук

Золотова Надежда Валерьевна, доктор физико-математических наук, доцент Физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук (ГАО РАН)

Защита состоится 25 мая 2022 года на заседании диссертационного совета Д 002.113.03 на базе Института космических исследований Российской академии наук по адресу: 117997 г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан « » апреля 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Цупко О.Ю.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Наличие магнитных полей в звездах и планетах является одним из важных факторов, определяющих многие физические процессы — как на самих небесных телах, так и в окружающем их космическом пространстве. Наиболее доступными объектами для наблюдений при изучении магнитных полей небесных тел выступают Солнце и Земля. Структура поля является достаточно сложной; изучение этой структуры возможно качественными методами, на основе современных и исторических данные об изменениях магнитного поля нашей планеты и эволюции солнечной активности. Другой возможный подход — теоретические модели эволюции магнитного поля (теория магнитного динамо, или в конкретном случае — земного и солнечного динамо). Оба подхода имеют свои достоинства и при использовании требуют согласования. Из этой задачи вытекает необходимость выделения некоторых количественных показателей для сравнения.

При работе с наблюдательными данными сложность получения количественных значений обычно связана с разного рода ограниченностью данных, например, по времени или по длине ряда, а также со степенью развития методов численной обработки. Тем не менее, некоторые недостатки рядов данных удается компенсировать при алгоритмической обработке (в частности, восстановление пробелов по имеющимся данным или с привлечением дополнительной информации).

Еще одна особенность, появляющаяся при работе с наблюдательными данными — невозможность прямых измерений. При работе с магнитными полями необходима модель для восстановления напряженности поля по «удаленным» измерениям.

Исследования структуры магнитного поля определяют характерные черты описательных моделей. Один из часто используемых приемов — выделение поверхности источника. Это гипотетическая граница между областью, где энергия магнитного поля превосходит кинетическую энергию плазмы, и областью с преобладанием солнечного ветра. Хорошее согласие с наблюдениями межпланетного магнитного поля на расстоянии 1 а.е. от Солнца получается при представлении поверхности источника в виде сферы радиусом $2.5R_{\odot} - 3.25R_{\odot}$. На этой поверхности силовые линии предполагаются радиальными, потенциал равен нулю. В сферическом слое между фотосферой и поверхностью источника поле потенциально; в области переноса солнечным ветром закон падения поля $\sim 1/r^2$. Поле во всей гелиосфере оказывается деформированным и смещенным по времени отображением поля на поверхности источника.

Проверка моделей по измерениям магнитного поля на фотосфере с помощью магнитографов показала хорошее согласие знаков радиальной компоненты магнитного поля вблизи Земли и поля на поверхности источника. Однако закон падения $\sim 1/r^2$ оказывается не совсем точным для количественных оценок напряженности поля (измеренное значение поля вблизи Земли оказывается больше, чем при теоретических оценках).

Метод расчета поля в гелиосфере с предположениями о радиальности поля и с выделением поверхности источника имеет ограничения. Основной недостаток — предположение об отсутствии токов в атмосфере Солнца над фотосферой. Однако другие модели требуют гораздо более громоздких расчетов. Но, например, для стационарной короны отличия от расчетов более простым способом невелики. Кроме того, классический метод позволяет получить соотношение разных гармоник в магнитном поле Солнца. Поэтому разработка метода, сочетающего точность результатов и небольшую вычислительную ёмкость, оста-

ется актуальной задачей.

Тем не менее общая расчетная структура поля достаточно хорошо согласуется с наблюдениями. Причиной этого может быть доминирующая роль крупномасштабного поля в формировании структуры. Значит, первые гармоники, от которых зависит глобальное поле, определяются достаточно точно. Поэтому можно предположить, что магнитное поле на поверхности источника тоже определяется достоверно, и общая структура поля в короне Солнца и околосолнечном пространстве должны определяться достаточно хорошо. Дополнительная проверка модели осуществляется при накоплении наблюдательных данных. Новая информация появляется при изучении вариаций крупномасштабной активности, корональных выбросов масс, структуры и поляризации короны, распределением корональных дыр и геомагнитных возмущений.

Увеличение точности измерений может затруднять составление адекватной модели. Чем более детальное описание процесса имеется, тем более сложная модель требуется для описания. Но поскольку сложные модели составляются на основе простых, то всегда остается актуальным выделение основных закономерностей процесса. По мере накопления и уточнения данных о любом физическом явлении требуется их анализ и сравнение с существующими моделями.

Основные методы выделения трендов относятся к области математической статистики. При работе с периодическими процессами (или чаще с квазипериодическими) активно используется гармонический анализ — не только классическое преобразование Фурье, но развитые на его основе методы: оконное преобразование, вейвлет-преобразование. Однако значение статистического исследования не исчерпывается расчетом характеристик фиксированного ряда данных.

В изучении моделей физических систем сложности возникают при применении математического описания к случайным компонентам (турбулентность, случайное воздействие на систему извне и т.п.). Трудно указать процесс, в котором нет никаких случайных переменных. Для описания подобных процессов применим, в первую очередь, вероятностный и статистический подход. Но при этом далеко не очевидным представлялся, что случайные флуктуации в системе могут оказывать ненулевое результирующее действие. Такие результаты привели к развитию исследований в направлении интеграции статистического и динамического подходов. Одним из результатов стало возникновение новых разделов науки — магнитная гидродинамика, статистическая гидромеханика и другие.

Новые математические задачи при обработке возникают не только при появлении случайных компонент в системе, но и при возникновении нелинейностей. Причиной могут быть как сложность самих исследуемых процессов, так и нелинейность, вносимая измерительным прибором. Например, нелинейность сигнала магнитографа приводит к усложнению интерпретации наблюдаемых спектральных линий. Методы решения нелинейных задач могут быть различными. В зависимости от конкретной проблемы это может быть линеаризация (МНК, нелинейные шкалы, логарифмические и степенные замены переменных), разложение на компоненты (гармонический анализ), внесение поправок, определяемых функцией прибора, в ряды измеряемых данных. А сравнение с теоретическими моделями при этом требует введения нелинейных параметров в сами модели.

Цели работы

Целью работы является определение проявления периодических или квазипериодических процессов в магнитных полях Земли и Солнца, оценка характерных времен этих процес-

сов. Вычисления опираются на данные наблюдений и предполагают сравнение с теоретическими моделями динамо для определения возможного обоснования полученных результатов.

В соответствии с целью диссертации ставятся следующие задачи:

1. Установить возможность возникновения квазипериодических процессов в инверсиях магнитного поля на основании сравнения с простой моделью динамо;
2. Сопоставить циклы активности в северном и южном полушариях Солнца на основании данных о солнечных пятнах;
3. Определить зависимость оценок величины магнитного поля Солнца от разрешения магнитограмм, найти параметр, количественно характеризующий эту зависимость;
4. Установить связь найденного параметра солнечным циклом;
5. Описать эволюцию дипольной и квадрупольной компонент магнитного поля Солнца во времени;
6. Определить наличие периодичностей и характерных времен в изменении амплитуд магнитного поля и в положении полюсов магнитного диполя и квадруполя;
7. Определить характерные времена в магнитостратиграфической шкале.

Решение поставленных задач предполагает применение новых и адаптацию известных методов обработки данных наблюдений, интерпретацию результатов анализа рядов данных с учетом современных представлений об исследуемых физических процессах, сопоставление с различными теоретическими моделями этих процессов.

Научная новизна

В работе впервые получена зависимость фрактальной размерности структур магнитного поля Солнца от фазы цикла активности. Ранее проводились количественные оценки хаусдорфовой размерности, однако в работах, относящихся к разному времени, появлялось значительное расхождение результатов. Помимо этого, рассмотрен еще один возможный фрактальный параметр (мера), зависимость которого от фазы цикла существенно слабее. Найденное различие может оказаться подтверждением существования нескольких типов формирования мелкомасштабных магнитных полей на Солнце.

Благодаря отдельному изучению временной эволюции гармоник магнитного поля Солнца получено подтверждение гипотезы формирования компонент поля с недипольной симметрией как следствие нарушения симметрии гидродинамических процессов в солнечном веществе. Для оценки степени асимметрии север-юг вычислены статистические характеристики рядов данных о числе и суммарной площади солнечных пятен.

Для анализа изменений квадрупольного магнитного момента Солнца с течением времени впервые применено представление в виде тензора. Хорошее согласие с результатами классического гармонического анализа позволяет предложить дальнейшее развитие идеи исследования компонент звездного магнитного поля методами линейной алгебры и тензорного анализа.

Впервые проведен анализ магнитостратиграфической шкалы за 250 млн. лет. Превыше исследования осуществлялись на более коротких интервалах времени из-за недостатка палеомагнитных данных. Помимо выявления общего характера процесса — отсутствия заметных следов периодического или квазипериодического процесса в смене магнитных полюсов Земли — произведено сравнение результатов для нескольких вариантов восстановления шкалы инверсий.

Параллельное исследование проявлений работы динамо для Земли и Солнца открывает возможность сопоставления особенностей эволюции процессов генерации магнитного поля для звезд и планет. Выявление сходства и различия требует большего числа звезд и планет в качестве объектов наблюдения. Однако даже пример двух наиболее исследованных объектов позволяет выделить возможные направления для поиска особенностей, присущих только звездному или только планетному динамо.

Практическая и научная ценность работы

Ценность результатов работы складывается из нескольких факторов.

Использование максимально длинных рядов данных, доступных на настоящий момент, позволяет уточнять результаты поисков периодичностей и характерных времен в вариациях солнечного и земного магнитных полей. Поскольку накопление и уточнение данных продолжается, результат диссертации становится одним из шагов в описании циклических компонент генерации магнитных полей.

Впервые получено объяснение различий предыдущих оценок фрактальных характеристик структур магнитного поля Солнца. Сравнение полученного результата с параметрами турбулентной среды позволяет сделать вывод о неслучайном характере изменений магнитного поля. Для магнитного поля Земли, напротив, исследование показало отсутствие регулярности в магнитных процессах. Этот результат закладывает задачу для теории магнитного динамо: определение роли случайных компонент в процессах генерации магнитного поля в звездах и в планетах.

Разбиение задачи описания магнитного поля на ряд мелких подзадач оказывается эффективным для упрощения анализа данных. Например, выделение двух проекций дипольного момента магнитного поля Солнца и их раздельное описание дает более ясную картину, чем анализ диполя в целом. Такой подход позволяет сочетать методики исследования — от простейшего статистического анализа до работы с фрактальными и геометрическими объектами — вместо построения одной модели, возможно, весьма сложной.

Опыт применения тензорного анализа для решения задач о магнитном поле Солнца раскрывает возможности для дальнейшего расширения области применения тензорного метода к различным задачам физики. Совместное использование нескольких математических методов позволяет разделить свойства исследуемого ряда данных от особенностей, привносимых при математическом преобразовании.

Результаты работы в описании двух основных гармоник магнитного поля Солнца ориентируют на проведение новых исследований эволюции более высоких гармоник. Основная структура гелиосферного магнитного поля определяется вкладом низких гармоник, однако более тонкая структура требует учета остальных компонент. Методы, использованные в работе, могут стать основой для их исследования (в частности, дополнение классического гармонического анализа геометрическими объектами соответствующей размерности: квадруполь, октуполь и т.п.).

Обоснованность и достоверность полученных результатов

В работе математический аппарат теоретической физики и фундаментальные физические законы использованы корректно. Всем принятым допущениям дано обоснование. При разработке алгоритмов численной обработки использовалось современное программное обеспечение. Все программы протестированы на базовых вычислительных задачах. Численное моделирование опирается на ряд известных теоретических моделей, предложенных другими авторами. Результаты, полученные численно-аналитическими способами, согласуются с наблюдательными данными.

Положения, выносимые на защиту

1. Среднее значение напряженности поля зависит от разрешения магнитограммы, изменения параметров этой зависимости в ходе солнечного цикла отражает наличие двух механизмов динамо: глобального регулярного и турбулентного;
2. Изменения напряженности дипольной и квадрупольной компонент поля Солнца не совпадают по фазе; смещение полюсов диполя опережает вращение кэррингтоновской системы координат, а квадруполь — отстает;
3. Знак фазового сдвига активности между северным и южным полушариями Солнца связан в долгопериодическими процессами в солнечной активности, при этом величина фазового смещения практически не проявляет модуляции;
4. Приведено тензорное представление квадрупольной компоненты магнитного поля Солнца; основные особенности изменения напряженности квадрупольной компоненты магнитного поля Солнца могут быть воспроизведены в модели асимметричного динамо с супердиффузией;
5. Долгопериодические вариации магнитной активности могут быть ассоциированы со случайными параметрами динамо.

Апробация работы

Предложенные методы и полученные результаты прошли апробацию и обсуждение на международных и всероссийских конференциях 15 Symposium of Study of the Earth's Deep Interior (2016), 11th International Conference and School Problems of Geocosmos (2017), Всероссийская школа-семинар по проблемам палеомагнетизма и магнетизма горных пород, посвященная 100-летию со дня рождения Г.Н. Петровой (2015), Физика плазмы в Солнечной системе (2020, 2021, 2022), Всероссийская конференция «Солнечная и солнечно-земная физика» (2019, 2020), Всероссийская конференция по магнитной гидродинамике (2018), Международная научная конференция «Ломоносовские чтения» (2019), Всероссийская астрономическая конференция (2021); на научных семинарах, проводимых в МГУ, ИЗМИРАН, НИВЦ МГУ.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах

1. Obridko V.N., Sokoloff D.D., Pipin V.V., Shibalva A.S., Livshits I.M., “ Zonal harmonics of solar magnetic field for solar cycle forecast” // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Pergamon Press Ltd. (United Kingdom), vol.225, 105743 (2021)
2. Obridko V.N., Pipin V.V., Sokoloff D.D., Shibalova A.S., “Solar large-scale magnetic field cycle patterns in solar dynamo” // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Oxford Journals, Oxford University Press (Oxford, UK, England), vol.504, pp.4990–5000 (2021)
3. Sokoloff D.D., Shibalova A.S., Obridko V.N., Pipin V.V., Shape of Solar Cycles and Mid-term Solar Activity Oscillations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Oxford Journals, Oxford University Press (Oxford, UK, England), vol.497, 4, pp.4376–4383 (2020)
4. Obridko V.N., Sokoloff D.D., Shelting B.D., Shibalova A.S., Livshits I.M., Cyclic Variations in the Main Components of the Solar Large-Scale Magnetic Field // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Oxford Journals, Oxford University Press (Oxford, UK, England), vol.492, 4, pp.5582–5591 (2020)
5. Shibalova A.S., Obridko V.N., Sokoloff D.D., Intermittency of the solar magnetic field and solar magnetic activity cycle // Solar Physics, т.292, №44, с.1–9 (2017)
6. Шибалова А.С., Обридко В.Н., Соколов Д.Д., Пипин В.В., Солнечный квадруполь в тензорном описании // Астрономический журнал, МАИК Наука-Интерпериодика, т.97, №10, с.849-857 (2020)
7. Sokoloff D.D., Shibalova A.S., Tracers of Periodicity in the Observational Data on Magnetic Fields of Celestial Bodies and the Dynamo Models // Geomagnetism and Aeronomy, изд-во Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), т.58, №7, с. 888-892 (2018)
8. Шибалова А.С., Обридко В.Н., Соколов Д.Д., Фазовый сдвиг между полушариями в цикле солнечной активности // Астрономический журнал, т.93, №10, с.918–922 (2016)
9. Соколов Д.Д., Шибалова А.С., Периодичности в шкале геомагнитной полярности // Физика Земли, №5, с.1–4 (2015)

Статьи в сборниках

1. “Cycle-dependent and cycle-independent surface tracers of solar magnetic activity”, Sokoloff D.D., Obridko V.N., Livshits I.M., Shibalova A.S. в сборнике European Geosciences Union General Assembly 2020, серия Geophysical Research Abstracts, издательство Copernicus GmbH on behalf of the European Geosciences Union (Germany), т. 22, с. 342-343, 2020
2. “Форма солнечных циклов и среднесрочные колебания солнечной активности”, Шибалова А.С., Обридко В.Н., Пипин В.В., Соколов Д.Д. Солнечная и Солнечно-Земная физика-2020, Пулково, с.365 – 366, 2020

Тезисы докладов

1. “Форма солнечных циклов и промежуточный масштаб колебаний солнечной активности”, Обридко В.Н., Пипин В.В., Соколов Д.Д., Шибалова А.С. в сборнике тезисов конференции Солнечная и Солнечно-Земная физика-2020, XXIV Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца, с. 64 <http://www.gaoran.ru/russian/solphys/2020/>, 2020
2. “Циклические вариации квадрупольной компоненты магнитного поля Солнца”, Шибалова А.С., Обридко В.Н., Соколов Д.Д., Шельтинг Б.Д., Лившиц И.М., 15 конференция Физика плазмы в Солнечной системе, ИКИ, с.8, 2020
3. Циклические вариации основных составляющих крупномасштабного магнитного поля, Обридко В.Н., Соколов Д.Д., Шельтинг Б.Д., Шибалова А.С., Лившиц И.М., Солнечная и Солнечно-Земная физика-2019, ГАО РАН, СПб, с.76, 2019
4. “Cycle-dependent and cycle-independent surface tracers of solar magnetic activity”, Sokoloff D.D., Obridko V.N., Livshits I.M., Shibalova A.S. в сборнике Solar irradiance: Physics-based advances, <https://astronomy2018.univie.ac.at/PosterAbstracts/posterFM09>, серия GA IAU-XXX, место издания IAU Vienna, тезисы, 2018
5. “Intermittence of solar magnetic field and solar magnetic activity cycle”, Shibalova A., Obridko V., Sokoloff D. в сборнике Russian conference on Magnetohydrodynamics, место издания ICMM Perm, тезисы, с. 121-121, 2018
6. “Новое поколение моделей генерации магнитных полей в небесных телах”, Соколов Д.Д., Юшков Е.В., Михайлов Е.А., Шибалова А.С. в сборнике Ломоносовские чтения, серия Физика, место издания МГУ, тезисы, с.108–108, 2017
7. “Periodicities in the Geomagnetic Polarity Timescale”, Shibalova A.S., Sokoloff D.D. в сборнике 15 Symposium of Study of the Earth’s Deep Interior, место издания SEDI Nantes, France, тезисы, с. 88–88, 2016
8. “Phase shift between solar hemispheres in the activity cycle”, Shibalova A.S., Obridko V.N., Sokoloff D.D. в сборнике 11th Intern. conf. and school Problems of Geocosmos, место издания SPb University SPb, тезисы, с.104–104, 2016
9. “Переменяемость солнечных магнитных полей в цикле солнечной активности”, Шибалова А.С., Обридко В.Н., Соколов Д.Д. в сборнике Солнечная и солнечно-земная физика – 2016, тезисы, с.64–64, 2016
10. “Периодичности в шкале геомагнитной полярности”, Соколов Д.Д., Шибалова А.С. в сборнике Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, место издания Филигрань Ярославль, тезисы, с.202–207, 2015

Личный вклад автора

Все исследования, результаты которых представлены в диссертационной работе, проведены лично автором в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в работу включён только материал, принадлежащий непосредственно автору.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 128 страниц, работа содержит 35 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 145 публикаций.

Содержание работы

В первой главе диссертации рассмотрен вопрос о строении магнитного поля Солнца и связи его компонент на разных масштабах. Для описания использованы фрактальные параметры — хаусдорфова размерность и мера. Эти два числа входят в линеаризованную зависимость оценки среднего поля по поверхности солнечного диска (B) от разрешения магнитограммы (d):

$$\ln B = -k \ln d + a. \quad (1)$$

Коэффициент k (показывающий фрактальную размерность структур) оказывается зависимым от фазы цикла солнечной активности. Такой результат объясняет расхождение в численных оценках зависимости $B(d)$ в работах разных авторов. Свободный член линейной зависимости (1), в отличие от параметра k , практически не меняется при разных уровнях солнечной активности. Различное поведение двух параметров свидетельствует о наличии нескольких механизмов генерации магнитного поля. Зависимость от активности Солнца проявляется в крупномасштабных магнитных структурах и мелких образованиях, появляющихся при распаде крупных; независимые от солнечного цикла структуры могут возникать при работе турбулентного динамо.

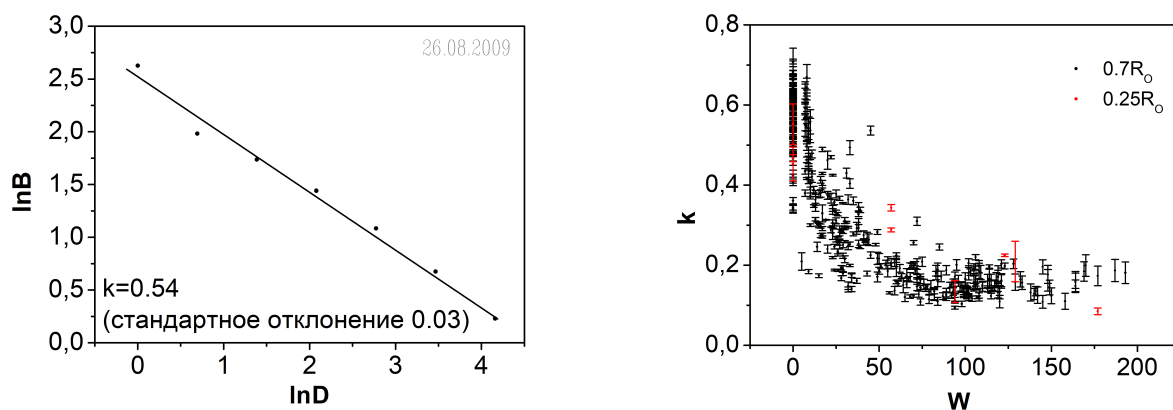


Рис. 1: Пример вычисления коэффициента k и зависимость k от активности солнца (по оси абсцисс — числа Вольфа)

Найденная величина фрактальной размерности позволяет установить наличие упорядоченности в общей структуре магнитного поля Солнца: весь диапазон значений k не до-

стигает единицы (размерности, соответствующей полностью стохастическому процессу). Более подробные расчеты величины коэффициента k показали, что при хорошем разрешении магнитограммы (малые d , видны более мелкие структуры) значение близко к $2/3$ — коэффициент, характеризующий Колмогоровскую турбулентность. Это дополнительное подтверждение наличия мелкомасштабного (турбулентного) динамо на Солнце.

Главы 2–4 посвящены более подробному изучению крупномасштабного поля Солнца.

В главе 2 рассматриваются два первых слагаемых в представлении магнитного поля в виде суммы гармоник, диполь и квадруполь. Эти компоненты дают наибольший вклад в общее магнитное поле и определяют его глобальную эволюцию.

Составлено детальное описание изменения напряженности дипольной и квадрупольной компонент в течение двух 11-летних циклов активности (одного физического цикла на Солнце). Получены диаграммы перемещения полюсов диполя и квадруполя для четырех последних циклов активности (21–24). Установлено постепенное возрастание вклада квадрупольной компоненты в общее поле в течение последних четырех циклов. Выделены различия в характере колебаний напряженности поля диполя и квадруполя и в скорости их поворота относительно кэррингтоновской системы координат. Средняя скорость диполя выше кэррингтоновской, он опережает вращение Солнца, квадруполь отстает от вращения солнечной системы координат.

Напряженность поля квадруполя и вариации его скорости имеют более выраженный циклический характер, чем у диполя. Параметры диполя меняются более сложным образом, на 11-летний цикл накладывается большое количество короткопериодических процессов.

При исследовании было выявлено, что имеет смысл деления диполя на две проекции, экваториальную и аксиальную. Все три компоненты демонстрируют различное поведение и могут соответствовать различным физическим процессам в солнечном веществе.

Аксиальный диполь не может быть полностью отождествлен с полярным полем. Последнее складывается также из более высоких нечетных гармоник, поэтому имеет большие значения, чем аксиальный диполь в отдельности.

При инверсии магнитного поля полный дипольный момент не обращается в ноль. Исчезает только вертикальная компонента. Момент смены полярности не совпадает с максимумом цикла активности Солнца, а опережает его на 0.5–1 год и занимает очень короткое время.

Свойства экваториального диполя в значительной мере (но не полностью) зависят от магнитных полей активных областей. Этот вклад в соответствии с законом Хейла уменьшается для активных областей, связанных с тороидальной компонентой магнитного поля (для четных относительно экватора компонент). Максимум экваториального диполя сдвинут относительно максимума солнечного цикла в сторону ветви спада активности. Положение максимума экваториального диполя хорошо локализуется во времени (максимум не растянут во времени). И аксиальный, и экваториальный диполь систематически уменьшаются в течение последних четырех циклов, что совпадает с общей тенденцией уменьшения солнечной активности.

Перемещение полюса диполя из полярной области в средние широты происходит очень быстро в узком диапазоне долгот. При различном наклоне диполя его полюса оказываются в разных широтах, что в соответствии с законом дифференциального вращения приводит к изменению скорости вращения вокруг солнечной оси. Среднее значение скорости диполя превосходит кэррингтоновское на $\sim 0.6\%$. Возможное объяснение этого явления — изменение долготы полюса диполя определяется исключительно экваториальной компонентой.

Полюса экваториального диполя расположены ниже широты 26° , что соответствует большей скорости дифференциального вращения (кэррингтоновская скорость по определению вычисляется на широте $\pm 26^\circ$). На более мелком временном масштабе в движениях диполя наблюдается случайные изменения направления, не связанные с фазой цикла.

Эволюция квадрупольно существенно отличается от ситуации с диполем. Квадруполь имеет общую с диполем тенденцию к уменьшению за последние четыре цикла, однако уменьшение квадрупольного момента значительно меньше, чем дипольного. В результате растет отношение квадрупольного момента к дипольному B_{quadr}/B_{dip} . Эта величина от 21 цикла к 24 возрастает почти в два раза, в то время как число солнечных пятен за тот же промежуток времени уменьшается вдвое. Такая ситуация сходна с положением перед минимумом Маундера, которому, судя по некоторым показателям, предшествовал рост вклада четных гармоник в общее магнитное поле.

Сглаживание по промежутку полгода (7 кэррингтоновских оборотов) выявляет еще одну интересную особенность. При устранении мелких флуктуаций в каждом максимуме цикла появляется набор пиков, разделенных глубокими провалами. Высота пиков не убывает со временем.

Вращение квадрупольной компоненты легче поддается разложению на регулярные составляющие, хотя в целом выглядит более сложным, чем движение диполя. Во вращении диполя заметнее наличие случайных компонент.

Основной тренд во вращении квадрупольно выражается в уменьшении долготы полюсов (примерно на 600° за 4 цикла), что предполагает скорость вращения меньшую, чем кэррингтоновская, на 0.28%. На вековое замедление накладываются циклические вариации. В результате скорость вращения квадрупольно уменьшается во время роста активности Солнца (на $\sim 0.06\%$ относительно средней скорости) и возрастает в фазе спада активности. Такое периодическое изменение скорости может быть связано с перемещением полюсов квадрупольно в меридиональном направлении. До достижения максимума солнечного цикла полюса квадрупольно расположены ближе к полюсам, где скорость дифференциального вращения ниже кэррингтоновской. После прохождения максимума полюса квадрупольно смещаются ближе к экватору, где скорость вращения превосходит кэррингтоновскую. Вековое замедление может быть связано и с постепенным смещением верхней границы между полями нового и старого поколения генерации в сторону низких широт. За последние 4 цикла эта граница сместилась с 30° до 20° .

Поскольку две рассмотренные гармоники обладают разными типами симметрий, можно проанализировать результат с точки зрения связи механизмов генерации четных и нечетных мод магнитного поля. В целом солнечный квадруполь демонстрирует поведение, отличное от эволюции диполя, и, соответственно, влияет на характер изменений полного магнитного поля. Однако выделить какое-либо характерное время или период, определяемые квадрупольно компонентой, не удастся (во всяком случае, в пределах исследуемого ряда данных). Поэтому можно ожидать, что для квадрупольно моды в слоях солнечного вещества не существует отдельного процесса генерации одновременно с возбуждением полей дипольно симметрии (тоже хотя бы для рассматриваемого промежутка времени). Возможно, величина квадрупольно момента меняется с тем же периодом, что и дипольно момент, 11 лет. Отличия в поведении диполя и квадрупольно могут возникать в результате отсутствия полной симметрии в гидродинамике процесса относительно экватора, что по-разному сказывается на четных и нечетных модах. На рассмотренном промежутке времени не наблюдалось необычных явлений в солнечной активности, как, например, практически полная концентрация солнечных пятен только в одном солнечном полушарии

(подобная картина наблюдалась в конце минимума Маундера). Появление такого явного нарушения зеркальности могло бы стать подтверждением гипотезы о роли асимметрии в различии эволюции четных и нечетных мод магнитного поля.

Определение, как именно отклонения от идеальной симметрии влияют на эволюцию диполя и квадрупольного поля требует дополнительного исследования с привлечением численного моделирования. Установление частоты возникновения нарушений симметрии тоже требует дальнейших исследований с более длинными рядами данных.

Тем не менее следует отметить, что современное поведение магнитного поля существенно отличается от картины, наблюдавшейся в течение прошлого века. Можно предположить, что аномалии связаны с приближением к новому глобальному минимуму. Предсказание осложняется недостатком данных о магнитном поле за прошедшие столетия. Архивных данных о квадрупольной компоненте магнитного поля нет, а записи об эволюции магнитного поля перед минимумом Маундера не всегда обладают достаточной точностью и подробностью. Одним из основных показателей, свидетельствовавших о значительной асимметрии, было распределение солнечных пятен относительно экватора. Современные наблюдения не фиксируют такого яркого проявления нарушения симметрии.

В пределах временного интервала, для которого доступна подробная информация о магнитном поле на настоящий момент, нет основания предполагать отдельные механизмы генерации для полей квадрупольной симметрии или генерацию полей смешанной четности. Возникновение четных гармоник достаточно уверенно можно объяснить как результат отклонений гидродинамических процессов от строгой симметрии относительно экваториальной плоскости Солнца.

В третьей главе более подробно рассмотрено проявление только дипольной компоненты поля Солнца — количественно оценивается асимметрия северного и южного полушария Солнца, которую можно наблюдать по солнечным пятнам. Ряд из 12 циклов активности проанализирован по двум индексам: число солнечных пятен и их суммарная площадь. Выделена группа циклов, где северное полушарие отстает от южного, и циклы, где северное полушарие опережает. В настоящее время временной сдвиг между полушариями невелик (составляет около 6–7 месяцев). В недавней истории солнечной активности этот сдвиг дважды менял знак, что может свидетельствовать о его более-менее периодическим изменениям с большими характерным временем (близким к длительности цикла Гляйсберга). Смена порядка следования для полушарий (южное опережает или южное отстает) не совпадает с эпизодами нарушения дипольной симметрии в данных о магнитном поле Солнца; для сравнения с вековыми вариациями нужен более длинный ряд данных.

Четвертая глава посвящена анализу отдельно квадрупольного магнитного момента. Гармоническое разложение, примененное в главе 2, дополнено тензорным описанием квадрупольного поля. Для решения поставленной задачи метод построения тензора квадрупольного момента обобщен с задачи электростатики на задачу мультипольного разложения магнитного поля.

Тензор квадрупольного момента вычислялся для промежутка времени 1976 – 2019 гг. Два собственных значения с наибольшим по абсолютной величине собственным значением, имеют противоположные знаки. Длины двух больших осей эллипсоида близки по величине и хорошо коррелируют между собой (коэффициент корреляции 0.92). Третья ось эллипсоида гораздо меньше по величине и практически не скоррелирована с двумя другими, коэффициент корреляции для первой и второй оси составляет 0.45.

Длины больших осей тензора квадрупольного момента тесно связаны с уровнем солнечной активности, определяемому по числу солнечных пятен, которое, в свою очередь, отра-

жает поведение компоненты магнитного поля, имеющей дипольную симметрию (источник данных по солнечным пятнам: WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels).

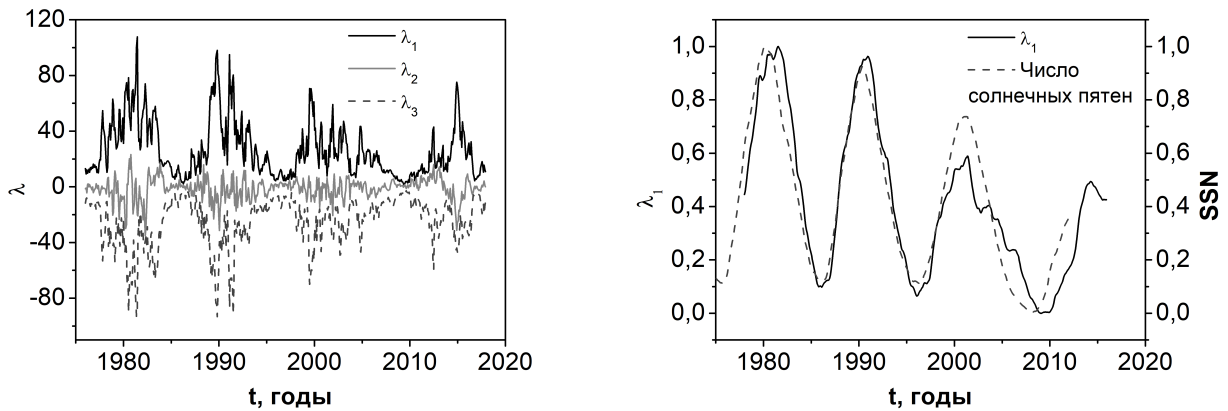


Рис. 2: Зависимость собственных значений тензора квадрупольного момента от времени; два бóльших по модулю значения соответствуют колебаниям напряженности поля в точках полюсов магнитного квадрупольного момента, третье собственное значение характеризует разницу абсолютных значений поля в положительном и отрицательном полюсах. Справа — соотношение длины большей оси квадрупольного момента (сплошная линия) и числа солнечных пятен (пунктир)

Произведено сравнение с теоретической моделью динамо (модель солнечного асимметричного динамо с супердиффузией); в обоих случаях ярко выражен 11-летний цикл с накладывающимися на него случайными (и возможно, квазипериодическими) колебаниями. В целом, наблюдательная и теоретические кривые похожи друг на друга настолько, насколько это допускает естественная вариабельность солнечного цикла.

Получена зависимость напряженности поля квадрупольного момента от времени, построены графики перемещения полюсов квадрупольного момента. Представление в виде тензора позволяет одновременно получить информацию об ориентации осей квадрупольного момента, напряженности поля его положительных и отрицательных полюсов, деформации структуры квадрупольного момента (отклонение от идеализированного представления в виде четырёхполюсника с равными по модулю зарядами в полюсах). Адаптация тензорного метода к задаче о магнитном квадрупольном моменте Солнца позволила провести сравнение наблюдений квадрупольного магнитного момента Солнца с рядом теоретических моделей магнитного динамо. Ещё одно достоинство тензорного метода — уменьшение трудоёмкости вычислений.

В пятой главе рассмотрен вид магнитного динамо, отличающийся от звездного — на примере магнитного поля Земли проводится сравнение эволюции основной компоненты поля для планеты и для звезды. Поставленная задача — исследование характера процесса смены полярности магнитного диполя Земли и определение возможных периодов в этой смене. В отличие от четко выраженной цикличности в проявлении процессов динамо на Солнце, инверсии дипольной составляющей поля на Земле ближе к случайному процессу.

Проведен вейвлет-анализ магнитостратиграфической шкалы для наиболее длинной из восстановленных в настоящее время шкал. Полученные спектры сопоставлены с результатами вычислений для модельных шкал инверсий — со случайным параметром и с циклически изменяющимся параметром.

Результат анализа показывает наличие характерной особенности в спектре колебаний

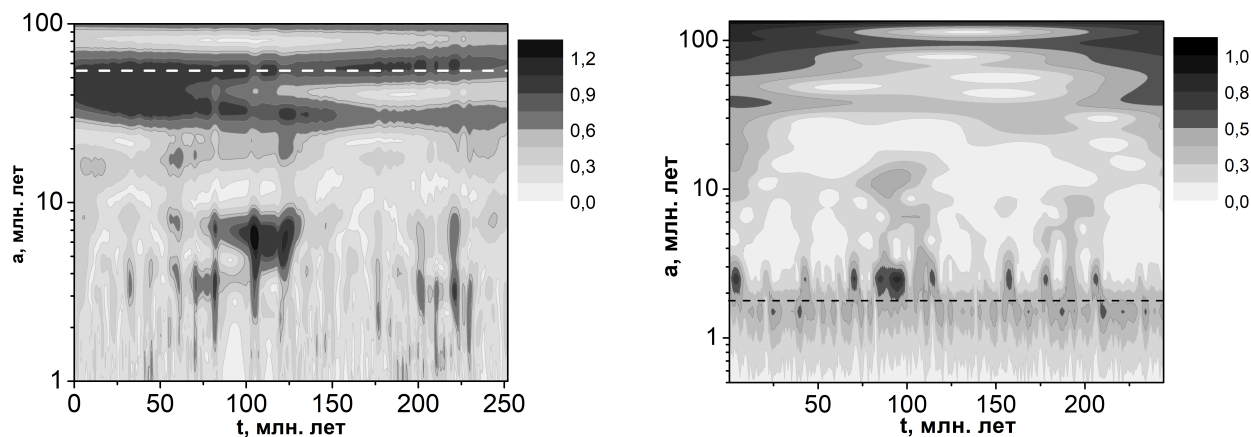


Рис. 3: Вейвлет-плоскости для реальной палеомагнитной шкалы и для моделированной шкалы

для периода около 50 млн. лет. Другие квазипериодичности не совпадают для разных вариантов реконструкции палеомагнитной шкалы, поэтому их исследование станет возможным только после утверждения геомагнитной шкалы.

Наилучшее совпадение вейвлет-плоскости и спектра магнитостратиграфической шкалы найдено для варианта со случайными флуктуациями одного из параметров динамо-модели. Таким образом, объяснение долгопериодических вариаций связано со случайными процессами в магнитном динамо.

Проведенный анализ подтвердил результат исследования более коротких отрезков шкалы инверсий геомагнитного диполя: первая гармоника поля Земли не проявляет периодических изменений. Это существенное отличие проявления планетного динамо от трасеров работы звездного динамо.

В заключении приведены результаты работы.

Список литературы

- [1] Калашников И.Ю., Соколов Д.Д., Чечеткин В.М., Статистика инверсий геомагнитного диполя по данным палеомагнитных наблюдений и простых моделей геодинамо // Физика Земли, т.51, №3, сс.383–391 (2015)
- [2] Лившиц И.М., Обридко В.Н., Изменения дипольного магнитного момента Солнца в течение цикла активности // АЖ, т.83, №11, сс.1031–1041, 2006
- [3] Петрова Г.Н., Нечаева Т.Е., Поспелова Г.Л., Характерные изменения геомагнитного поля в прошлом // М.: Наука, 175 с. (1992)
- [4] Brandenburg A., Sokoloff D., Subramanian K., Current Status of Turbulent Dynamo Theory: from Large-scale to Small-scale Dynamos // Space Sci. Rev., 169, p.123 (2012)
- [5] Frick P., Galyagin D., Hoyt D.V., Nesme-Ribes E., Schatten K.H., Sokoloff D., Zakharov V., Wavelet analysis of solar activity recorded by sunspot groups // Astronomy and Astrophysics, Vol.328, pp.670–681 (1997)

- [6] Galyagin D.K., Reshetnyak M.Yu., Sokolov D.D., Frick P.G., Scaling of the geomagnetic field and scales of geomagnetic polarity // *Dokl. Earth Sci*, Vol.360, N.4, pp.617–620 (1998)
- [7] Livshits I. M, Obridko V.N., Variations of the Dipole Magnetic Moment of the Sun during the Solar Activity Cycle // *Astron. Rep.*, Vol.50, №11, p.926 (2006)
- [8] Moss D., Kitchatinov L.L., Sokoloff D., Reversals of the solar dipole // *A & A*, Vol.550, L9 (2013)
- [9] Pipin V.V., Moss D., Sokoloff D., Hoeksema J.T., Reversals of the Solar Magnetic Dipole in the Light of Observational Data and Simple Dynamo Models // *A & A*, Vol.567, A90 (2014)
- [10] Sokoloff D., Khlystova A., Abramenko V., Solar small-scale dynamo and polarity of sunspot groups // *MNRAS*, Vol.451, pp.1522–1527 (2015)
- [11] Stenflo J.O., Scaling laws for magnetic fields on the quiet Sun // *A & A*, Vol.541, id.A17 (2012)