# ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ГЛАВНАЯ (ПУЛКОВСКАЯ) АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

## Стрекалова Полина Владимировна

## Структура и динамика мелкомасштабных образований на Солнце

Специальность 1.3.1 – Физика космоса, астрономия (физико-математические науки) Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

> Научный руководитель: доктор физико-математических наук Наговицын Юрий Анатольевич

г. Санкт-Петербург – 2023

# оглавление

Введение	4
Глава 1. Основные параметры факельных образований	18
1.1 Физические характеристики ФО	18
1.2 Пространственное распределение ФО	20
1.3 Проявления в других частотных диапазонах	22
1.4 Структурная эволюция и время жизни ФО	28
1.5 Выбор и обработка данных	30
1.6. Анализ выявленных физических параметров объектов, исследован	ие
статистических зависимостей	32
1.7 Выводы Главы 1	39

# Глава 2. Временные вариации магнитного поля факельных

образований	40
2.1 Выбор и первичная обработка данных	41
2.2 Вейвлет-анализ временных рядов	43
2.3 EMD-анализ временных рядов	47
2.4 Результаты обработки	51
2.5 Интерпретация долгопериодических колебаний магнитного	
поля ФО	58
2.6 Выводы Главы 2	59
Глава 3. Анализ колебательных мод магнитного поля факельных	
образований	61
3.1 Анализ колебаний	64
3.2 Анализ сигнала на наличие цветных шумов	66
3.3 Модель магнитной структуры факела	72

Список литературы	81
Приложения	80
Заключение	77
3.4 Выводы Главы 3	76

#### Введение

## Актуальность темы

Стремительное развитие наблюдательной техники, в том числе для внеатмосферных наблюдений, в течение последних десятилетий способствовали значительному возрастанию качества и полноты данных о Солнце во всех диапазонах длин волн. Благодаря современным наблюдательным данным стал возможен не только структурный, но и детальный динамический анализ мелкомасштабных образований солнечной атмосферы, размерами менее 10 угловых секунд. С помощью данных о магнитном поле, полученных с космического аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO), появилась возможность уточнить основные характеристики и проследить эволюцию мелкомасштабных магнитных полей [1], что может изменить наше представление о структуре магнитных полей на Солнце в целом и дать больше ключей к пониманию процессов протекания минимумов солнечной активности, когда нет сильных возмущений магнитного поля.

В последнее время получила развитие локальная гелиосейсмология [2] направление исследований, нацеленное на изучение физических свойств объектов по их колебаниям. Благодаря высокому временному разрешению данных аппарата SDO и возможности получать практически непрерывные серии наблюдений неограниченной длины, появилась возможность детально изучить колебания квазипериодические магнитного поля И других параметров мелкомасштабных образований [3]. Всестороннее изучение природы таких колебаний достоверность существующих моделей позволит проверить мелкомасштабных структур и создать новую трехмерную динамическую модель объекта, отвечающую наблюдениям. Кроме того, с постепенным улучшением качества наблюдательных данных о Солнце в различных диапазонах длин волн пространственно разрешались всё более мелкие и слабые по интенсивности

объекты, которые не всегда корректно отождествлялись друг с другом на различных высотах солнечной атмосферы. Это привело к некоторой номенклатурной путанице, требующей уточнения.

## Краткий обзор тематической терминологии

В данном разделе будут употребляться термины на английском языке, так как он является международным, и не для всех приводимых терминов есть прямые соответствия в русскоязычной номенклатуре.

Исторически термином факелы (*faculae*) назывались яркие поля с горизонтальными размерами в сотни тысяч километров, окружающие группы пятен и активные области [4]. Во многих современных работах сохраняется такая трактовка термина [5]. Они определялись как фотосферные образования, плохо заметные в белом свете в центре диска и хорошо видимые у лимба. В хромосфере похожие образования были названы *plages*. Позже между ними было установлено соответствие, и они стали восприниматься как разные проявления одного и того же явления [6]. С развитием наблюдательной техники стало возможно пространственно разрешить более мелкие структуры. Вместо факелов стали иногда употреблять термины «факельные поля» или «факельные площадки» (*facula fields*).

Для мелкомасштабных структур, составляющих факельные поля, используется целый ряд наименований: facular points, filigree, facular granules, magnetic knots, facular knots, bright points, micropores [7, 8, 9, 10].

В русском языке накладывается дополнительное усложнение терминологии. То, что в англоязычной литературе называют термином *plage*, у нас называют флоккульным полем – хромосферным аналогом факельного поля. А составляющие флоккульных полей – флоккулы – должны являться аналогами факелов, но слово «факел» у нас до сих пор чаще используется применительно ко всему факельному полю. Однако термин «факелы» используется ещё и для мелкомасштабных фотосферных структур, принадлежащих «спокойному Солнцу» [11]. Наряду с факелами, к уединённым мелкомасштабным образованиям на Солнце относят: яркие точки (magnetic bright points, bright points, network bright points), patches, pores, micropores. Эти термины некоторые авторы используют и применительно к структурам, составляющим факельные поля [12]. Микропорами К. Топка в работе [13] называет большие магнитные трубки, являющиеся частью plages.

Такое смешение терминологий частично оправдано наблюдениями, показывающими родство природы мелкомасштабных структур на спокойном Солнце и в активных областях [14].

В некоторых работах присутствует некая систематизация мелкомасштабных структур. Например, Р. Мюллер [8] использует понятие *facular points* для мелкомасштабных составляющих факельных полей, а для аналогичных образований на спокойном Солнце использует общий термин *photospheric network* (фотосферная сетка) и её изолированные элементы он называет *network bright points*. Он также утверждает о сходной природе этих элементов. Однако приводимые им параметры, такие как среднее время жизни, не превышающее 18 минут и размеры менее 0,5", не учитывают наличие на Солнце более крупных и стабильных образований, наблюдающихся в магнитном поле.

Стоит упомянуть также, что имеют место ошибки, появляющиеся при неверном цитировании работ. Так, например, в работе [15] написано, что время жизни факельных узлов составляет менее 30 минут, а в работе [16], на которую он ссылается, написано, что оно превышает 30 минут.

Кроме того, на Солнце выделяют ещё один класс мелкомасштабных объектов, окончательно вносящих путаницу в и без того сложную номенклатуру. Полярные факелы (*polar faculae*), которые представляют собой уединённые мелкомасштабные образования с магнитным полем порядка сотен гаусс, наблюдающиеся на широтах более  $\pm 50^{\circ}$ .

Наибольшее количество работ посвящено изучению мелкомасштабных структур, принадлежащих активным областям, однако именно на спокойной фотосфере мы можем наиболее чётко отследить и изучить структурную и динамическую эволюцию каждого уединённого объекта.

Данная работа посвящена изучению уединённых мелкомасштабных структур, принадлежащих спокойному Солнцу. Они видны на всех широтах в магнитном поле, наблюдаемом в линии железа (Fe I) на длине волны  $\lambda = 6173$  Å. Их время жизни составляет десятки часов, а магнитное поле может достигать значений свыше 1000 Гс. Даже этот неполный список характеристик позволяет заметить, что эти объекты не попадают ни под один термин, приведённый выше.

В некоторых работах приводятся обобщённые термины для мелкомасштабных магнитных образований. Например, в работе [17], все такие элементы называются *cells* (ячейки), или, в более новой работе [18], все магнитные малые элементы спокойного Солнца названы *patches* (заплатки). Однако эти термины охватывают структуры с полями от 100 до 2000 Гс и включают в себя, помимо исследуемых в данной работе объектов, как более крупные и мощные поры, так и гораздо более слабые и нестабильные элементы солнечной фотосферы.

Поэтому нами было принято решение выделить данные структуры в надкласс, включающий в себя все подобные образования, и назвать такие объекты **факельными образованиями** – *facular formations* (ФО/FFs). В работе будут последовательно приведены основные наблюдаемые характеристики и физические свойства таких факельных образований.

В виду всех терминологических проблем и в связи с отсутствием общепринятой классификации мелкомасштабных образований, в данной работе таблица дополнительно представлена сводная основных наблюдаемых мелкомасштабных структур Солнце. Таблица находится разделе на В Приложения.

#### Цель исследования

Целью данной работы является всестороннее изучение структурных и динамических особенностей так называемых факельных образований (далее – ФО) и, главным образом, их колебательных свойств. Для достижения этой цели выполняются следующие задачи:

1. Выделение объектов — ФО в отдельный надкласс согласно их физическим параметрам. Выбор тестовой группы объектов, соответствующих определению, по данным современного космического аппарата SDO. Уточнение физических и динамических характеристик, таких как: магнитное поле, пространственное распределение, время жизни, площадь, этапы эволюции. Проверка зависимостей между полученными характеристиками.

2. Создание оптимальной методики обработки данных для анализа каждого объекта в отдельности, минимизирующей ошибки обработки.

3. Гелиосейсмология ФО. Изучение длительных (десятки-сотни минут) квазипериодических вариаций магнитного поля факельных образований с помощью вейвлет-анализа и методов, основанных на принципе эмпирического разложения сигнала на колебательные моды (Empirical Mode Decomposition).

4. Уточнение представления о магнитной структуре ФО, а также качественная интерпретация долгопериодических колебаний их магнитного поля.

### Научная новизна

Научная новизна состоит в следующем:

Объекты исследования – мелкомасштабные магнитные образования, не относящиеся к активным областям, являются гораздо менее изученными, чем другие объекты на Солнце, обладающие повышенным магнитным полем, такие

как пятна, группы пятен, факельные площадки и их элементы [19, 20, 21, 22]. Их физические и эволюционные характеристики впервые были изучены комплексно.

В диссертационной работе используются современные космические данные, полученные аппаратом SDO. Данные о магнитном поле, с инструмента HMI, установленном на SDO, обладают высоким пространственным разрешением (1") и временным разрешением (45 секунд) [23].

Для исследования были разработана методика обработки данных, минимизирующая возможные ошибки отождествления и артефакты периодичностей.

Впервые найдены и изучены долгопериодические колебания магнитного поля факельных образований с периодами, превышающими 25 минут, тогда как в прочих исследованиях основное внимание уделяется 3-5 минутным колебаниям, хорошо исследованным, которые можно объяснить с помощью распространения МГД волн в магнитных трубках [10, 24].

Также в диссертации применяются новые методы выявления цветных шумов, основанные на методе Empirical Mode Decomposition [25, 26, 27, 28], и использующие генерацию искусственных шумов для определения доверительных интервалов [29]. На основе этих методов впервые выделены три режима для не принадлежащих к цветным шумам колебаний.

## Научная и практическая значимость

1. Приведённые в диссертации данные о параметрах факельных образований и их соответствии между собой, уточняют наши представления о мелкомасштабных магнитных структурах на Солнце и дополняют наше понимание о строении солнечного магнитного поля в целом.

2. Впервые обнаружены и изучены колебания магнитного поля ФО с типичными периодами десятки-сотни минут, имеющие квазипериодический характер и открывающие перспективы для гелиосейсмологии ФО.

3. Предложена новая модель магнитной структуры факельного образования, основанная на предположении о неглубоком залегании ФО под фотосферой, хорошо согласующаяся с наблюдениями. Это может изменить наши представления о строении мелкомасштабных магнитных образований на Солнце.

4. Полученные результаты дают возможность построения адекватной динамической модели факельного образования и проверки основных существующих моделей подобных мелкомасштабных структур на Солнце.

## Апробация работы

Результаты, представленные в диссертации, докладывались на следующих всероссийских и международных конференциях:

• Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика» (Санкт-Петербург, Россия, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019; Устный доклад).

Международная конференция "RadioSun-5", (Ceske-Budejovice, Czech Republic, 2016; Устный доклад.)

• Конференция молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом" в рамках Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике "Физические процессы в космосе и околоземной среде" (Иркутск, Россия, 2017, 2019, 2022; Устный доклад).

• Всероссийская VII Пулковская молодежная астрономическая конференция (Санкт-Петербург, Россия, 2018; Устный доклад).

• Международная конференция BUKS2018 Workshop on "Waves and Instabilities in the Solar Atmosphere: Confronting the Current State-of-the Art" (Tenerife, Spain, 2018; Стендовый доклад).

## Публикации по результатам работы в журналах, рекомендуемых ВАК

1. Strekalova P. V., Nagovitsyn Yu. A., Riehokainen A., and Smirnova V.V. Longperiod variations in the magnetic field of small-scale solar structures // Geomagn. and Aeron. – 2016. – Vol. 56. – Is. 8. – P. 1052–1059.

 Kolotkov D. Y., Smirnova V. V., Strekalova P. V., Riehokainen A., & Nakariakov V.
 M. Long-period quasi-periodic oscillations of a small-scale magnetic structure on the Sun // Astron. and Astrophys. – 2017. – Vol. 598. – Id L2.

3. Strekalova P. V., Nagovitsyn Yu., V. Smirnova. Analysis of Oscillatory Modes of the Magnetic Field of Solar Facular Formations // Geomagn. and Aeron. – 2018. – Vol. 58. – Is. 7. – P. 893-898.

4. Solov'ev A. A., Strekalova P. V., Smirnova V.V., Riehokainen A. Eigen oscillations of facular knots // Astrophys. and Space Sci. – 2019. – Vol. 364. – Is. 2. – Id. 29. – P. 8.

5. Riehokainen A., Strekalova P. V., Solov'ev A. A., Smirnova V. V., Zhivanovich I., Moskaleva A. V., Varun N. Long quasi-periodic oscillations of the faculae and pores // Astron. and Astrophys. – 2019. – Vol. 627. – Id. A10. – P. 7.

6. Solov'ev A. A., Smirnova V.V., Strekalova P. V. Long-Period Oscillations of Solar Facular Knots // Astrophys. Bulletin– 2020. – Vol. 75.– P. 176-181.

7. Strekalova, P. V., Solov'ev, A. A., Smirnova, V. V., Nagovitsyn, Yu. A. Magnetic Structure of Facular Formation in the Solar Atmosphere // Geomagnetism and Aeronomy (Engl. Transl.). – 2022. – Vol. 62, – Is. 8, – P. 1016-1020.

## Прочие публикации

1. Стрекалова П.В., Наговицын Ю.А., Риехокайнен А., Смирнова В.В. Временные вариации магнитного поля солнечных факелов // Всероссийская

ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика», Труды. – 2015. – С. 339-342.

2. Стрекалова П.В., Риехокайнен А., Наговицын Ю.А., Смирнова В.В. Структура и динамика одиночных факельных образований // Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика», Труды. – 2016 – С. 301-304.

3. Стрекалова П.В., Риехокайнен А., Наговицын Ю.А., Смирнова В.В. Колебания и структурная эволюция мелкомасштабных магнитных образований на Солнце // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике, Труды. – 2017. – С. 76-78.

4. Стрекалова П.В., Колотков Д.Ю., Наговицын Ю.А., Смирнова В.В. Анализ колебательных мод магнитного поля факельных образований на Солнце образованиях // Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечноземная физика», Труды. – 2017. – С. 309-312.

5. Стрекалова П.В., Соловьев А.А., Смирнова В.В., Наговицын Ю.А. Физическая интерпретация наблюдаемых явлений в факельных образованиях // Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика», Труды. – 2018. – С. 357-360.

6. Стрекалова П. В., Смирнова В. В., Наговицын Ю. А., Соловьев А. А. Интерпретация Квазипериодических Колебаний Факельных Образований На Солнце // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике, Труды. – 2019. – С. 109-111.

7. Стрекалова П. В., Соловьев А. А., Смирнова В. В., Наговицын Ю. А. Оценка периода низкочастотных колебаний факельных образований на Солнце // Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика», Труды. – 2019. – С. 373-376.

8. Стрекалова П.В., Риехокайнен А., Смирнова В. В., Соловьев А. А., Тлатов А.Г., Живанович И. Вариации площадей и ширин солнечных корональных дыр в

2017–2020 гг., // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике, Труды, – 2022. стр. 121–123.

## Личный вклад автора диссертации

Автору принадлежит основная роль в постановке задачи об исследовании ФО, выборе наблюдательных данных и методов их анализа. Обработка данных SDO о магнитном поле ФО выполнена автором. При обсуждении постановки задач, теоретической интерпретации результатов и подготовке совместных публикаций полученных результатов вклад автора сопоставим с вкладом других участников работ.

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложений и списка литературы, включающего работы автора. Общий объем диссертации составляет 92 страницы, включая 22 рисунка, 7 таблиц. Список литературы содержит 112 наименований.

## Содержание диссертации

Во **Введении** приводится краткий обзор современного состояния исследуемой проблемы, а также поднимается вопрос используемой в научном сообществе номенклатуры, связанной с данной темой, после чего обосновывается использование приведённых в диссертации терминов. Также во **Введении** показаны актуальность и основные цели исследования, обсуждаются научная новизна и практическая значимость результатов, содержатся основные положения, выносимые на защиту, список публикаций по теме диссертации и её краткое содержание.

В Главе 1 представлены основные физические параметры факельных образований, такие как: размер, характерная напряжённость магнитного поля, время жизни и этапы эволюции, пространственное распределение по диску Солнца на магнитограмме. Рассмотрены проявления факельных образований в разных спектральных диапазонах на различных уровнях солнечной атмосферы.

В пункте 1.1 дано строгое определение объектам исследования – факельным образованиям (ФО). Критериями определения стали: максимальная напряженность магнитного поля, размер структуры, уединенность (обособленность от пятен, факельных полей и активных областей) и время жизни.

В пункте 1.2 описывается пространственное распределение факельных образований по поверхности фотосферы.

В пункте 1.3 рассматриваются проявления факельных образований в различных диапазонах длин волн, соответствующих разным уровням солнечной атмосферы, как то: в линии Fe 6173Å, в ультрафиолетовых линиях 1600Å, 1700Å (фотосфера) и 304Å (хромосфера и переходный слой), а также в белом свете.

Пункт 1.4 посвящён структурной эволюции ФО. Время жизни ФО условно поделено на три этапа: начало формирования, квазистабильная фаза и фаза распада [30]. Начало и конец жизни определены по значению магнитного поля объекта относительно двукратного значения поля окружающего фона (см. страницу 27).

В пункте 1.5 описаны методы отбора и обработки объектов, соответствующих определению факельного образования.

В пункте 1.6 представлена таблица, в которой для выборки из 75 объектов приведены значения широты и мгновенной долготы на момент середины ряда, а также значение максимального достигаемого магнитного поля, длина временного ряда, коэффициент корреляции среднего поля в контуре и площади этого контура.

Также показано отсутствие однозначной корреляции между средним магнитным полем в контуре, составляющем в среднем треть от его максимального значения, и площадью ФО в этом контуре.

В **Главе 2** описаны обнаруженные в сигнале магнитограмм ФО квазипериодические вариации, изложены и обоснованы методы исследования.

В пункте 2.1 представлены характеристики данных, получаемых с космического аппарата SDO, описаны данные, выбранные для исследования. Приведены основные методы обработки, разработанные с учётом возможных артефактов ошибок отождествления.

В пункте 2.2 дано краткое описание вейвлет-анализа и описаны его преимущества по сравнению с Фурье-анализом для задач, поставленных в данной диссертации [31].

В пункте 2.3 кратко описаны основные принципы EMD-анализа, использовавшегося в Главе 2 для снятия долгопериодического тренда и в Главе 3 для более детального анализа колебаний магнитного поля факельных образований [32].

В пункте 2.4 приведены результаты исследования колебаний магнитного поля ФО в виде трёх таблиц, включающих в себя: максимальное магнитное поле, максимальное среднее поле в контуре, значение магнитного поля, по которому строился контур, площадь внутри контура, отношение значения максимального магнитного поля к значению границы контура, интервалы периодов колебаний, пиковые значения периодов колебаний.

С помощью вейвлет-анализа выявлены квазипериодические вариации во временных рядах среднего значения магнитного поля в контуре (треть от максимального значения) с периодами в интервале 25-280 минут.

Получен график зависимости периодов колебаний от максимального значения магнитного поля, а также гистограмма встречаемости максимальных периодов колебаний. В пункте 2.5 сделано предположение о возможной качественной интерпретации исследуемых долгопериодических колебаний.

Глава 3 посвящена более глубокому анализу природы колебательных мод, наблюдаемых во временных рядах изменения сигнала магнитограмм факельных образований.

В пункте 3.1 описываются результаты анализа сигнала магнитограмм с помощью разложения сигнала на эмпирические колебательные моды.

Пункт 3.2 содержит исследование сигнала магнитограммы на наличие цветных шумов: белого, розового и красного. Для достижения этой цели используется метод, основанный на методике Empirical Mode Decomposition. Приводится описание используемого метода, разработанного в [28, 29, 32] и включающего в себя построение доверительных интервалов для спектральных плотностей мощности колебательных мод. Такие доверительные интервалы строятся с помощью моделирования искусственных шумов с заданной спектральной плотностью мощности.

Во всех исследованных случаях, где максимальное по модулю магнитное поле превышало 500 Гс, выявлено наличие значимых колебательных мод, т.е. лежащих выше доверительных интервалов цветных шумов. Все обнаруженные значимые колебательные моды показывали один из трёх типов поведения:

- Период и амплитуда растут со временем;
- Период и амплитуда уменьшаются со временем;
- Режимы возрастания и убывания амплитуды и периода сменяют друг друга.

В пункте 3.3 предложена модель магнитной структуры ФО, основанная на представлении о неглубоком залегании ФО в подкотосферных слоях [36].

На основе предложенной модели проведена оценка характерных для неё периодов колебаний магнитного поля, результаты которой хорошо согласуются с наблюдаемыми значениями. Также оценена глубина факельного образования под фотосферой. Она составила 300-400 км.

В Заключении диссертации сформулированы основные результаты работы, а также перспективы дальнейшей разработки темы.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты статистического анализа 75 факельных образований с выявленными физическими параметрами исследуемых объектов, таких как характерные значения магнитных полей, пространственное распределение по диску Солнца, связь с яркими структурами, наблюдаемыми в фотосфере и хромосфере, время жизни и структурная эволюция.

2. Обнаружение и исследование длительных, с периодами от 25 до 280 минут, квазипериодических колебаний магнитного поля факельных образований. Выявление значимых колебательных мод трёх типов в сигналах магнитограмм для факельных образований с максимальным магнитным полем более 500 Гс.

3. Результаты качественной интерпретации значимых колебательных мод, обнаруженных во временных рядах изменений параметров факельных образований.

## Глава 1. Основные параметры факельных образований

В данной главе даётся определение факельного образования. Представлены основные физические параметры факельных образований, такие как: размер, характерное значение магнитного поля, время жизни. Описаны этапы структурной эволюции факельных образований. Показано пространственное распределение по диску Солнца на магнитограмме. Рассмотрены проявления факельных образований в разных частотных диапазонах на разных уровнях солнечной атмосферы. Представлен каталог из 75 объектов, удовлетворяющих определению факельного образования.

## 1.1 Физические характеристики ФО.

Для того, что начать анализировать физические параметры магнитных структур, было необходимо дать конкретное определение тем объектам, с которыми будет проводиться работа. Во Введении обоснована причина введения нового термина для группы магнитных структур, названных факельными объектов образованиями. Критериями для отбора стали: максимальная напряженность магнитного поля, размер структуры, уединенность (обособленность от пятен, факельных полей и активных областей) и время жизни. Таким образом, было дано определение исследуемым магнитным структурам, которые были названы факельными образованиями.

Факельные образования (ФО) – надкласс, объединяющий мелкомасштабные долгоживущие, устойчивые фотосферно-хромосферные образования, не принадлежащие активным областям. Их характерные размеры достигают значений 1,5 – 4 Мм, время жизни составляет десятки часов, а абсолютные значения максимального достигаемого сигнала магнитограммы варьируются в пределах 400-1100 Гс [3].

Используемое слово «надкласс» подразумевает включение в группу факельных образований всех мелкомасштабных элементов на Солнце, удовлетворяющих определению.

Интервал напряженности магнитных полей не является жёстким, так как его границы получены эмпирически на основе наблюдений [30]. Уединенные ФО не принадлежат факельным полям вокруг пятен или активных областей. Магнитные структуры в факельных полях в данной работе не рассматривались.

На магнитограммах ФО выглядят, в зависимости от знака магнитного поля, как уярчения и потемнения, хорошо заметные относительно фона. В отличие от пятен, ФО имеют филаментарную структуру: в течение времени жизни они могут распадаться на части, представляющие собой, по всей видимости, пучки магнитных трубок, и собираться вновь. Такие части представляют собой единую динамическую систему и расстояние между ними редко превышает диаметр самой крупной из них.

На Рисунке 1 представлены примеры магнитограмм типичных факельных образований. Данные объекты имеют размер порядка трех-шести угловых секунд. Данные: SDO/HMI level\_1, 45 s.



Рисунок 1 – Примеры магнитограмм типичных факельных образований по данным SDO/HMI. На момент съёмки абсолютное значение магнитного поля составляло: а) 315 Гс, b) 530 Гс, c) 580 Гс соответственно

## 1.2 Пространственное распределение ФО

Пространственное распределение факельных образований и других мелкомасштабных структур по диску Солнца в магнитном поле практически не зависит от широты, однако, они наиболее заметны на широтах от -50° до +50°. Уменьшение количества ФО на восточном и западном краю нулевой широты гораздо менее выражено, нежели у полюсов. Вероятно, магнитное поле таких объектов имеет не только вертикальную, но и горизонтальную компоненту [3].

Мелкомасштабные магнитные структуры различных типов наблюдаются на любой фазе одиннадцатилетнего солнечного цикла на любых широтах. Однако наибольшее их количество приходится на годы минимума солнечной активности, что может говорить об их связи с крупномасштабным магнитным полем. К полюсам их плотность сокращается. Положительная и отрицательная полярности на относительно спокойном диске, не возмущённом большим количеством активных областей, на больших масштабах условно чередуется, и, следуя за дифференциальным вращением Солнца, образует стрелоподобный паттерн, видимый на Рисунке 2. Красным цветом отмечено положительное магнитное поле от 50 до 1000 Гс, синим цветом отмечено отрицательное поле от -1000 до -50 Гс. Наиболее отчётливо этот паттерн виден в полосе широт от -30° до +30° относительно солнечного экватора.

Долгоживущие ФО могут быть расположены как на высоких широтах, так и вблизи экватора. Было замечено, что на широтах +50° до -50° их число возрастает в периоды минимума цикла, что соответствует циклическим вариациям солнечных факелов [37]



hmi.M\_45s.20150627\_040000\_TAI.2.magnetogram.fits\_1\_0
HPLT (arcsec)

Рисунок 2 – Пространственное распределение ФО и мелкомасштабных магнитных структур

На Рисунке 3 показана зависимость координаты – магнитное поле для 75 объектов. Для её построения взяты абсолютные значения максимума магнитного поля и модули широты и долготы. Зависимость обладает большой дисперсией, однако линия регрессии демонстрирует, что более мощные факельные образования склонны появляться на близких к экватору широтах, тогда как от долготы объекта максимальное значение сигнала магнитограммы практически не зависит.



Рисунок 3 – Левая панель: Зависимость модуля значений максимума магнитного поля от модуля широты. Уравнение линейной регрессии  $y = (-0.033 \pm 0.008)x + (47.643 \pm 5.261)$ ; коэффициент линейной парной корреляции  $r_{xy} \approx -0.417 \pm 0.106$ . Правая панель: Зависимость модуля значений максимума магнитного поля от модуля долготы. Уравнение линейной регрессии  $y = (-0.007 \pm 0.011)x + (19.977 \pm 6.955)$ ; коэффициент линейной парной корреляции  $r_{xy} \approx -0.074 \pm 0.117$ 

## 1.3 Проявления в других частотных диапазонах

Факельные образования, хорошо видимые на магнитограммах, полученных по наблюдениям в линии железа с длинной волны 6173Å, имеют свои наблюдательные проявления и в других диапазонах излучения. Как и факельные площадки, они видны как уярчения в крыльях сильных хромосферных линий H<sub>α</sub> и H и K Ca II [38]. Кроме того, они наблюдаются в некоторых ультрафиолетовых линиях, излучение которых приходит из фотосферы и нижней хромосферы.

Например, на Рисунке 4 показано, как выглядит ФО, магнитограмма которого приведена на Рисунке 1(панель а), в различных линиях. Максимальное значение его магнитного поля в момент съёмки равнялось 315 Гс. На каждое изображение наложен магнитный контур по значению 50% и 90% от максимума,

для облегчения идентификации. Видно, что на карте интенсивности в континууме (панель а), на месте данного ФО находится небольшое потемнение, однако в целом его яркость сравнима с фоном. Это связано с хорошо известным эффектом подавления излучения магнитным полем. При значениях магнитного поля свыше 400 Гс магнитное подавление достаточно для того, чтобы значение относительной интенсивности объекта было меньше единицы, и такой объект казался более тёмным по отношению к фону. По мере удаления от центра диска Солнца этот эффект теряет свои наблюдательные проявления и все объекты у лимба наоборот выглядят уярчениями [20].



Рисунок 4 – Карты интенсивности ФО (при максимальном магнитном поле на время построения карт B=315Гс) в линиях a) 6173Å, b) 1600Å, c) 1700Å и d) 304Å

Кроме того, уярчениями относительно фона выглядят слабые объекты с полем до 300 Гс (см. Рисунок 6). На панелях b и с Рисунка 4 представлены карты интенсивности в линиях с λ 1600Å и 1700Å. Их излучение приходит с диапазона высот от 450 до 1500 км над фотосферой [39]. Хорошо заметно, что магнитному

контуру соответствуют уярчения на обеих картах. Для всех исследованных  $\Phi O$  отклонение положения на магнитограмме и картах интенсивности в данных линиях не превосходят размеров порядка одного диаметра самого  $\Phi O$ . Это связано с тем, что высоты, соответствующие обеим этим линиям, находятся достаточно близко к высоте образования линии  $\lambda$  6173Å, по данным наблюдений, в которой и строятся используемые нами магнитограммы. Однако в линии с  $\lambda$  304Å, принадлежащий широкому диапазону высот хромосферы и переходного слоя, отклонение от положения на магнитограмме уже является значительным и может превышать два размера  $\Phi O$ . Причина этого — отклонение магнитных линий на больших высотах, что хорошо соответствует результатам исследований мелкомасштабных структур, опубликованных [40].

В Таблице 1 указаны основные параметры линий, в которых наблюдают аппараты HMI и AIA, установленные на спутнике SDO [41, 42]. Серым цветом выделены линии, данные в которых были использованы в этой работе. В столбце Char.  $\log(T)$  указаны характерные температуры излучения соответствующих первичных ионов.

Channel	Region of atmosphere	Char. $\log(T)$
6173Å	Photosphere	2,5
4500 Å	Photosphere	3,7
1700 Å	temperature minimum, photosphere	3,7
304 Å	chromosphere, transition region	4,7
1600 Å	transition region, upper photosphere	5
171 Å	quiet corona, upper transition region	5,8
193 Å	corona and hot flare plasma	6,2; 7,3
211 Å	active region corona	6,3
335 Å	active region corona	6,4
94 Å	flaring corona	6,8
131 Å	transition region, flaring corona	5,6; 7,0

Таблица 1 – характеристики спектральных линий, используемых в работе SDO/HMI и SDO/AIA.

Чтобы проследить связь ФО на разных высотах, были построены одномерные профили поперечного сечения на момент времени, когда значение магнитного поля ФО было максимальным.

Сопоставление одномерных мгновенных профилей поперечного сечения для карт интенсивности, построенных по данным в различных спектральных линиях, также подтверждает, что все объекты на этих картах являются проявлениями одного и того же объекта на различных высотах солнечной атмосферы. Пример сопоставления таких профилей, полученных на один и тот же момент времени приведён на Рисунке 5.

На панелях а-с Рисунка 5 представлены профили интенсивности в ультрафиолетовых линиях 304, 1700 и 1600 Å соответственно. На панелях d и е – профили для магнитного поля и яркости в континууме. В линиях видны уярчения над областью усиленного магнитного поля, тогда как в континууме наблюдается заметное уменьшение яркости. На уровне хромосферы, в линии 304 Å профиль становится более широким, что связано, скорее всего, с конфигурацией магнитного поля ФО.

Стоит отметить, что относительная яркость ФО в белом свете зависит от магнитного поля. При значениях сигнала магнитограммы, превышающих 400 Гс, наблюдается чёткое магнитное подавление, и ФО выглядят тёмными относительно фона. При меньших значениях ФО сравнимы с фоном или являются более яркими (Рисунок 6) [30]. Некоторая скученность точек на Рисунке в районе 300-400 Гс может быть объяснена сложностью структуры магнитного поля и эффектами проекции. Т.е. если мы видим магнитное подавление на значении магнитного поля, например, в 350 Гс, фактическое магнитное поле может оказаться значительно выше наблюдаемого.



Рисунок 5 – Одномерные профили, полученные одновременно в разных спектральных линиях для ФО № 65 в Таблице 2b. Профили интенсивности в ультрафиолетовых линиях: a) 304 Å, b) 1700 Å и c) 1600 Å соответственно; d) Профиль магнитного поля; e) Профиль яркости в континууме



Рисунок 6 – Связь между магнитным полем ФО и их относительной яркостью в континууме

## 1.4 Структурная эволюция и время жизни ФО

За время жизни типичное факельное образование претерпевает структурные изменения, заключающиеся в изменении формы, размера, яркости на магнитограмме и, в некоторых случаях, изменение визуальной целостности. Эволюционный путь ФО был разделён на три стадии: начало формирования, квазистабильная фаза и фаза распада.

За начало времени жизни принимался момент, когда среднее по половине мощности магнитное поле объекта превышало фон более чем в два раза. Значение фона определялось для каждой структуры методом усреднения нескольких одномерных профилей некоторой области спокойного Солнца, построенных вблизи наблюдаемого объекта.

В течение времени жизни факельное образование может визуально разделяться на две и более части, расстояние между которыми не превышает значение порядка диаметра самого ФО, т.е. нескольких угловых секунд. Динамика, а также наложение на магнитограмму контура, порядка 50-100 Гс показывает, что части связанны друг с другом и могут считаться единым объектом. В середине эволюционного цикла выделяется квазистабильная фаза, в течение которой ФО проявляет наибольшую визуальную стабильность и целостность.

Идущая после квазистабильной фазы стадия распада характеризуется ослаблением сигнала магнитограммы и меньшей целостностью магнитного контура, проведённого по половине мощности магнитного поля.

На Рисунке 7 частично показана структурная эволюция объекта №65 из Таблицы 2а с максимальным по модулю значением магнитного поля 688 Гс. Полное время жизни данного объекта составило 27 часов.



Рисунок 7 – Кадр 1- 5 кадр – фаза формирования; 6 – 12 кадр – квазистабильная фаза; 13 - 15 кадр – фаза распада

Время жизни исследуемых объектов являлось одним из критериев выбора анализируемых данных. Исходя из постановки задачи, выбирались магнитные структуры, время жизни которых составляло более 9 часов, а время квазистабильной фазы более пяти часов.

Количественное значение времени жизни мелкомасштабных фотосферных структур в разных источниках варьируется [43] от нескольких десятков минут до нескольких часов, как у отдельных факелов из факельных полей [32, 30].

## 1.5 Выбор и обработка данных

Для изучения магнитного поля ФО были использованы современные спутниковые данные, полученные с космического аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO), на котором установлен инструмент Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), получающий снимки полного солнечного диска в линии Fe на длине волны  $\lambda$ =6173Å. Минимальный шаг по времени между двумя последовательными кадрами составляет 45 секунд. Пространственное разрешение составляет 1".

Кроме данных о магнитном поле за те же даты были проанализированы данные об интенсивности в фотосферных линиях 1600Å и 1700Å, а также в хромосферной линии 304Å с шагом по времени 48с. Эти данные были получены инструментом Atmospheric Imaging Assembly (AIA) аппарата SDO. Так же использовались данные в континууме с SDO/HMI.

Преимуществом данных, полученных с аппарата SDO, является возможность практически непрерывного отслеживания изменения параметров объекта в течение долгого времени. Чтобы в полной мере воспользоваться этим преимуществом, выбирались стабильные долгоживущие объекты, разрешимые на магнитограмме и обладающие магнитным полем, многократно превышающим уровень аппаратных шумов. Отдельные параметры, такие как: время жизни, значение магнитного поля, яркость в континууме и УФ диапазоне в ходе исследования рассматривались для большого количества факельных образований. Это было необходимо для выявления общих закономерностей физических характеристик и динамического поведения исследуемых объектов. Более полное и аккуратное исследование проводилось на тестовой группе факельных образований, включающей 75 объектов.

В ходе работы были использованы четыре группы данных:

- 2013.05.01 2013.05.01 6 объектов;
- 2013.07.06 2013.07.07 37 объектов;
- 2015.06.26-2015.06.28 16 объектов;
- 2017.05.29-2017.05.30 16 объектов.

Относительно небольшое количество объектов в тестовой группе обуславливается методами обработки, нацеленными на максимально корректное и полное исследование каждого объекта.

Даты, за которые были взяты данные, выбирались таким образом, чтобы минимизировать влияние угла наклона Солнца относительно картинной плоскости. Также, в указанные даты солнечная активность была мала. Пятен либо было мало, либо они отсутствовали вовсе.

Обработка данных производилась с помощью пакета Matlab. Применялись стандартные процедуры и функции, представленные в этом пакете.

Для аккуратного анализа отдельных ФО из магнитограмм и для каждого объекта последовательно вырезалось окно бокса таким образом, чтобы за всё время наблюдения в него попадал весь сигнал от объекта и не попадал сигнал других источников. С каждой новой картой окно бокса перемещалось со скоростью дифференциального вращения Солнца на данной широте, следя за объектом. Таким образом, формировались временные ряды, позволяющие исследовать физические и динамические свойства факельных образований. Внутри вырезанных участков магнитограмм объект выделялся с помощью контура. Экстремальные значения (максимальные для ФО с положительным полем и минимальные для ФО с отрицательным полем) среднего магнитного поля внутри этого контура представлены в столбцах 5, Таблиц 2a и 2b. Здесь и далее иногда вместо словосочетания «экстремальное магнитное поле», для простоты понимания будет употребляться «максимальное магнитное поле». Однако, каждый раз речь будет идти именно об экстремальном значении.

Значение магнитного поля, по которому проводился контур, выбиралось таким образом, чтобы контур на продолжении всего временного ряда оставался максимально целостным и при этом в окошко следящего бокса не попадало флуктуаций магнитного поля от более слабых и не относящихся к объекту наблюдения магнитных элементов. Значения магнитного поля, по которому были проведены контуры для выборки объектов приведены в столбцах 6, Таблиц 2а и 2b. В столбцах 7 тех же таблиц приведено отношение значения экстремального магнитного поля к значению проведённого контура. Среднее значение этого отношения для рассмотренных объектов составляет 3,25.

В целях минимизации ошибок отождествления, дополнительного отслеживания целостности контура и для изучения поведения факельных образований в течение их времени жизни, для каждого объекта создавался и просматривался фильм, содержащий вырезанные для обработки участки магнитограмм с наложенными контурами.

## 1.6. Анализ выявленных физических параметров объектов, исследование статистических зависимостей

Результаты обработки данных для удобства восприятия разбиты на две таблицы со сквозной нумерацией – Таблицы 2a и 2b. В Таблице 2a содержатся объекты с номерами с 1 по 38, в Таблице 2b – с 39 по 75.

32

Для рассматриваемых в данной работе объектов полное время жизни составило от 9 до 33 часов. Однако для улучшения качества последующих исследований более важна была продолжительность квазистабильной фазы, составившая от 5 до 19 часов. Временной ряд для каждого объекта либо являлся частью квазистабильной фазы (объекты 1-30 в Таблице 2а), либо равнялся её продолжительности (объекты 31-38 в Таблице 2а, объекты 39-75 в Таблице 2b).

В Таблицах 2а и 2b приведены параметры, полученные для тестовой группы факельных образований: Широта, мгновенная долгота на момент середины соответствующего временного ряда, максимальное достигаемое значение поля магнитного (минимальное отрицательных ΦO), для максимальное (минимальное) среднее поле В контуре, значение контура, отношение максимального поля к значению контура, длина временного ряда, коэффициент корреляции для среднего поля в контуре и площади этого контура.

№	широта,°	долгота,°	экстрем. м. поле, Гс	сред. м. поле Гс	контур, Гс	экстр. м.поле/ контур	длина врем. ряда (мин)	коэфф.корр поле/площадь
1	-44,4	-13,8	680	500	150	4,53	600*	-0,399
2	-36,9	-2,7	560	350	150	3,73	600*	0,156
3	-44,8	9,2	390	240	150	2,60	600*	0,323
4	-43,5	14,5	420	210	150	2,80	600*	-0,283
5	-39,8	3,2	510	290	150	3,40	600*	0,226
6	-40,6	1,6	620	110	150	4,13	600*	-0,293
7	-22,1	-13,8	930	340	400	2,33	780*	-0,046
8	-44,6	-17,5	460	300	150	3,07	780*	0,120
9	41,3	-4,0	480	290	150	3,20	780*	0,137
10	-29,6	7,1	530	170	50	10,60	780*	0,040
11	47,0	-19,9	420	210	100	4,20	780*	-0,018
12	39,5	7,4	540	230	100	5,40	780*	0,189
13	-33,2	-6,2	-570	-300	-170	3,35	780*	-0,158
14	-30,3	-2,4	-600	-330	-170	3,53	780*	-0,021
15	34,1	-12,9	-550	-320	-170	3,24	780*	0,028
16	-26,1	5,7	-570	-320	-170	3,35	780*	0,029
17	-28,6	4,3	-710	-350	-200	3,55	780*	0,103
18	39,0	-18,5	-380	-140	-150	2,53	780*	0,715
19	-22,4	14,5	700	290	250	2,80	780*	0,168
20	-30,8	42,0	430	210	150	2,87	780*	0,191
21	39,9	42,1	520	375	250	2,08	780*	-0,235
22	-28,6	-30,1	560	370	250	2,24	780*	-0,139
23	-23,6	-18,8	560	390	180	3,11	780*	-0,087
24	21,4	15,9	540	320	180	3,00	780*	-0,131
25	24,1	-53,1	480	220	100	4,80	780*	0,419
26	22,8	-53,5	520	210	100	5,20	780*	-0,310
27	22,5	-53,7	390	180	100	3,90	780*	0,120
28	29,5	0,0	-730	-450	-250	2,92	780*	-0,100
29	-32,1	0,8	-540	-370	-190	2,84	780*	0,052
30	-28,9	1,3	-640	-450	-240	2,67	780*	0,047
31	44,6	-3,4	440	335	200	2,20	702	0,013
32	41,3	2,0	470	300	170	2,76	780	0,293
33	8,9	18,1	1100	675	400	2,75	637	-0,302
34	-13,5	-18,8	-840	-510	-300	2,80	1140	-0,142
35	18,0	-18,5	-730	-470	-200	3,65	488	-0,050
36	-17,8	-18,9	-670	-405	-200	3,35	900	-0,223
37	-13,5	-18,8	-845	-450	-200	4,23	712	-0,027
38	31,4	-22,2	565	176	50	11,30	722	-0,667

Таблица 2а – физические характеристики ФО

№	широта,°	долгота,°	экстрем. м. поле, Гс	сред. м. поле Гс	контур, гс	экстр. м.поле/ контур	длина врем. ряда (мин)	коэфф.корр поле/площадь
39	15,2	0,2	850	540	300	2,83	450	-0,376
40	-22,6	40,2	-840	-390	-250	3,36	600	-0,082
41	-21,7	3,4	-590	-370	-200	2,95	450	-0,227
42	-23,4	-5,9	-640	-430	-250	2,56	1140	0,002
43	-36,1	35,8	580	424	300	1,93	765	0,125
44	35,9	16,0	675	419	200	3,38	631	-0,249
45	-22,5	25,7	720	430	250	2,88	787	-0,438
46	24,2	-0,4	700	386	200	3,50	841	0,638
47	-34,2	-27,8	-645	-475	-300	2,15	645	-0,376
48	-30,3	-12,1	-755	-540	-300	2,52	1020	-0,048
49	-24,4	-15,0	-690	-375	-200	3,45	600	0,074
50	-36,2	12,5	-490	-355	-200	2,45	555	-0,448
51	-13,2	7,0	-660	-410	-200	3,30	577	-0,111
52	9,3	17,6	-715	-420	-200	3,58	712	-0,062
53	-6,0	-8,8	-685	-480	-300	2,28	675	-0,134
54	13,4	14,7	-455	-265	-130	3,50	510	0,211
55	28,6	-3,1	-510	-305	-150	3,40	585	0,003
56	5,3	-18,2	-680	-370	-150	4,53	652	-0,201
57	-35,7	0,3	525	310	150	3,50	555	0,022
58	-14,6	-16,1	550	310	150	3,67	652	-0,033
59	-16,0	-10,8	730	510	350	2,09	742	0,286
60	-10,8	24,1	470	295	150	3,13	615	-0,022
61	-5,7	16,9	730	500	300	2,43	561	0,593
62	-1,6	24,4	470	295	150	3,13	473	0,257
63	15,1	1,3	538	338	200	2,69	360	-0,122
64	32,3	3,0	-567	-369	-200	2,84	300	0,034
65	47,6	4,2	-688	-427	200	-3,44	900	-0,108
66	-33,0	-9,9	-565	-237	-100	5,65	300	-0,103
67	-30,2	-6,0	-613	-366	-300	2,04	600	0,105
68	-25,9	14,2	-551	-294	-150	3,67	300	-0,154
69	-23,7	-23,0	290	250	150	1,93	360	-0,050
70	-32,0	-2,3	-543	-364	-200	2,72	600	-0,002
71	-30,6	13,8	711	450	200	3,56	720	-0,241
72	-28,7	42,7	772	665	500	1,54	780	-0,145
73	-27,5	-40,0	614	418	300	2,05	360	-0,164
74	-43,8	24,0	528	273	250	2,11	480	-0,164
75	26,0	23,4	-800	-680	-300	2,67	540	0,125

Таблица 2b – физические характеристики ФО

Ha представлена Рисунке 8 зависимость продолжительности квазистабильной фазы, т. е. в данном случае, длины временного ряда, от абсолютного максимального Из значения магнитного поля. статистики исключены объекты с 1 по 31, так как их временные ряды полностью входили в квазистабильную фазу, но не равнялись ей. Из графика видно, что чем больше максимальное достигаемое магнитного значение поля, тем В среднем продолжительнее его квазистабильная фаза. То есть более мощные факельные стабильность образования способны сохранять И целостность более продолжительное время.



Рисунок 8 – Зависимость продолжительности квазистабильной фазы от максимального магнитного поля ФО. Уравнение линейной регрессии  $y = (0.49 \pm 0.19)x + (322.27 \pm 129.74);$  коэффициент линейной парной корреляции  $r_{xy} \approx 0.35 \pm 0.14$ 

Важно заметить, что значения коэффициентов корреляции среднего поля в контуре и площади этого контура очень малы и не прослеживается однозначной корреляции между этими двумя параметрами. Среднее значение коэффициентов
корреляции для всех ФО составило -0,025, что близко к 0, то есть к отсутствию какой-либо корреляции. Это также подтверждает предположение о сложности структуры магнитного поля ФО, как и отсутствие чёткой зависимости магнитного поля от координат. Кроме того, если предположить, что ФО может быть подобно мелкому пятну [44], но в несколько раз меньше, то его лёгкое «тело» может увлекаться восходящими и нисходящими потоками плазмы, совершая колебания относительно картинной плоскости, как бы «покачиваясь на волнах». В таком случае на изменение площади значительно влияет эффект проекции.

На Рисунке 9 представлено распределение коэффициентов корреляции между модулем среднего поля в контуре и площадью этого контура в зависимости от значений максимального достигаемого значения магнитного поля.



Рисунок 9 – Распределение коэффициентов корреляции модуля среднего поля в контуре и площади этого контура в зависимости от значений максимального достигаемого значения магнитного поля. Уравнение линейной регрессии  $y = (-0.0004 \pm 0.0002)x + (0.2346 \pm 0.1213);$  коэффициент линейной парной корреляции  $r_{xy} \approx -0.2487 \pm 0.1134$ 

Видна, отмеченная линией регрессии, слабая тенденция, согласно которой у более мощных факельных образований чаще наблюдается антикорреляция поле/площадь и её абсолютное значение больше для факельных образований с большим магнитным полем.

На Рисунке 10 изображена гистограмма для абсолютных значений экстремального достигаемого магнитного поля для 75 исследованных факельных образований. На гистограмме видно, что максимальная плотность вероятности и, соответственно, максимальное число объектов приходится на диапазон примерно соответствующий 550-600 Гс. Эта диаграмма косвенно подтверждает возможность выделения ФО в надкласс элементов по такому параметру, как магнитное поле.



Рисунок 10 – гистограмма для абсолютных значений экстремального достигаемого магнитного поля ФО. Красная линия соответствует нормальному распределению. Для данного шага максимальное количество объектов имеет экстремальное значение магнитного поля около 550-600 Гс

# 1.7 Выводы Главы 1

- Представлены основные физические характеристики факельных образований.
- Рассмотрена структурная эволюция факельных образований. Выделено три фазы эволюции: начальная фаза, квазистабильная фаза и фаза распада.
- Показано, что магнитное поле ФО не зависит от долготы, кроме того, не . наблюдается чёткой антикорреляции между изменением площади контура объекта и магнитного поля в этом контуре. Этот результат подлежит тщательному осмыслению и остаётся предметом дискуссии. Одним из объяснений может послужить предположение о сложной структуре магнитного поля факельных образований, а также о существенном эффекте проекции, связанном с собственными движениями ФО. Также данный результат, возможно является следствием структурной неоднородности объекта вкупе с пространственным разрешением используемых данных, недостаточным прослеживания ДЛЯ антикорреляции, связанной с сохранением магнитного потока.

### Глава 2. Временные вариации магнитного поля факельных образований

В данной главе диссертации описаны обнаруженные в сигнале магнитограмм ФО квазипериодические колебания – основа для дальнейших исследований этого объекта в рамках локальной гелиосейсмологии [2].

Представление о динамике магнитного поля, влияющей на физические параметры той или иной структуры, можно получить, исследуя его квазипериодические вариации. Подобные вариации были ранее обнаружены в различных частотных диапазонах для целого ряда солнечных структур: для пятен, пор, корональных петель, факельных площадок [45, 46]. Наиболее исследованы трех и пятиминутные колебания наблюдаемых физических параметров на фотосфере Солнца, интерпретация которых связывается с распространением магнитогидродинамических (МГД) волн [47]. Длительные периоды колебаний интенсивности излучения и магнитного поля, от 40 минут и более, были также обнаружены в активных областях и в солнечных пятнах, с помощью наземных и космических инструментов [22, 48, 49, 50]. Проявление в частотном спектре долгопериодических компонент некоторые авторы связывают с особенностями движения исследуемых структур [51], с собственными колебаниями этих структур [52], и с «просачиванием» магнитозвуковых волн от фотосферы к более высоким слоям солнечной атмосферы [45; 53]. Однако интерпретация долгопериодических вариаций (более 30 минут) в солнечных структурах до сих пор является предметом дискуссий.

В данной работе внимание уделяется именно таким колебаниям с периодами от 30 минут и более. Особенный интерес здесь представляет изучение долгопериодических временных вариаций магнитного поля мелкомасштабных структур (факельных образований, пор), так как такие вариации практически не исследованы. Периоды колебаний интенсивности мелкомасштабных структур в интервале 10-25 минут активно изучались в последнее время [54]. Некоторые авторы интерпретировали такие периоды влиянием фотосферной грануляции на динамические свойства структур [54]. Объяснить периоды 25 минут и более с помощью теории распространения МГД волн оказывается невозможным [40, 55]. Поэтому, такие долгопериодические вариации представляют наибольший исследовательский интерес [56, 57].

### 2.1 Выбор и первичная обработка данных

Используемые нами данные о магнитном поле факельных образований были получены, как и в первой главе, с помощью магнитографа Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), установленного на космическом аппарате Solar Dynamics Observatory (SDO) [58]. HMI наблюдает полный солнечный диск на длине волны  $\lambda$  6173 Å, с пространственным разрешением в 1 угловую секунду. Максимальное временное разрешение получаемых магнитограмм составляет 45 с.

Тестовая группа из 75 объектов, описана в Главе 1. Длина временного ряда составила от 300 до 1140 минут. Абсолютное значение экстремального магнитного поля для каждого факельного образования составило от 290 до 1100 Гс. Каждое ФО в процессе обработки отслеживалось с помощью бокса, размеры которого по координатам X и Y варьировались от 15x15 ріх на 35x35 ріх, в зависимости от размеров ФО, а также с учётом собственного перемещения ФО внутри бокса, которое могло менять своё направление несколько раз за время наблюдений. Геометрический центр ФО, или самой крупной его части на магнитограмме за время жизни ФО мог смещаться в пределах 10 пикселей от центра бокса в любую сторону. Размеры бокса обусловлены, в том числе и требованием, чтобы объект не покидал бокс в процессе отслеживания. Скорость бокса подбиралась таким образом, чтобы ФО не выходило за пределы бокса, оставалось максимально близко к центру большую часть времени и не имело стойкой тенденции перемещения по оси X. Экстремумы магнитного поля ФО определялись заново для каждого следующего кадра. Ожидаемая скорость бокса рассчитывалась по формулам, для дифференциального вращения Солнца, описанным в работах [59-61]. В значениях напряжённости магнитного поля ФО также компенсировался эффект проекции. Гелиографическая широта центра диска Солнца В<sub>0</sub> на дату наблюдений близка к нулю и не вносит ощутимого вклада в исследуемые вариации.

Периоды колебаний определялись для временных рядов среднего магнитного поля в заданном контуре. Значения контуров для каждого исследованного объекта представлены в таблицах 2a и 2b Главы 1. Среднее значение поля в выбранном контуре – интегральная величина и, в отличие от максимального значения магнитного поля. не имеет отождествления С конкретным пикселем на магнитограмме. Это позволило избежать возможных ошибок, связанных с артефактом, появляющимся из-за «перескакивания» максимального отсчёта с пикселя на пиксель – так называемого эффекта Р2Р (pixel to pixel) [62, 63].

P2P Артефакт имеет происхождение, обусловленное аппаратное дискретным характером приёмника – ССО-матрицы. Он возникает, когда экстремальный отсчёт в ФО переходит границу двух соседних пикселей на матрице приёмника. При ЭТОМ возникает ситуация, когда фактически экстремальный отсчёт проецируется на границу пикселей, т.е. частично присутствует в обоих. И в пикселе, из которого он «уходит», значение магнитного поля понижается. При этом информация о максимальном поле всё равно продолжает считываться именно с этого пикселя. В момент окончательного перехода магнитного «ядра» ФО на соседний пиксель, поле скачком возрастает до прежних значений. По этой причине возникает паразитный сигнал, имеющий периодичность. И хотя периоды, порождаемые самим артефактом, находятся в диапазоне 2-8 мин [64], они могут опосредованно влиять и на более долгопериодические компоненты [65].

Поэтому, совершая переход от наблюдения за экстремальным отсчётом ФО к значению среднего поля в контуре, которое не имеет физического соответствия пикселю на изображении, мы избавляемся от возможных искажений, вносимых паразитным сигналом данного артефакта [50].

### 2.2 Вейвлет-анализ временных рядов

Для первичного выявления периодичности в сигнале магнитограмм использовался вейвлет-анализ временных рядов [66].

Прежде чем переходить к описанию вейвлет-анализа, стоит упомянуть широко известный Фурье-анализ. Многие классические методы анализа временных рядов основаны на преобразовании Фурье:

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-it\omega} \, dx, \qquad (2.1)$$

которое не является локализованным по времени, что представляет собой существенный недостаток при обработке нелинейных и нестационарных сигналов, таких как сигналы магнитограмм Солнца. Кроме того, с помощью преобразования Фурье нельзя выявить фазовую и частотную модуляцию сигнала. Первые попытки разработки метода, устраняющего этот недостаток, были предприняты в работе [67] и развиты в работе [68], где было введено понятие мгновенного (спектрограммы). В современных спектра мощности математических пакетах применяется метод оконного преобразования Фурье, в ходе которого исходный сигнал разбивается на сегменты, к каждому из которых применяется преобразование Фурье. Набор из мгновенных спектров этих сегментов и будет являться спектрограммой исходного сигнала:

$$\Psi(\omega, t) = \int f(s)g(s-t)e^{-i\omega s}ds \qquad (2.2)$$

Оконное преобразование локализовано и по частоте, и по времени, однако для него действуют определённые ограничения. Так, разрешающая способность локализации ограничена принципом неопределённости Гейзенберга, согласно которому для конкретного момента времени нельзя установить однозначное соответствие между определённым моментом времени и конкретными спектральными компонентами в сигнале. При этом чем уже окно, тем лучше временное разрешение, но тем хуже частотное. И наоборот. Подробно метод мгновенного спектра рассмотрен в [69].

Основные сведения о вейвлет-анализе временных рядов изложены в книге И. Добеши [66]. Вейвлет-преобразование — интегральное преобразование, которое представляет собой свертку вейвлет-функции с сигналом. Оно было создано как инструмент, который решает проблему неопределенности Гейзенберга для построения частотно-временных характеристик сигнала. Как и оконное преобразование Фурье, вейвлет преобразование даёт локализованное по частоте и времени представление исследуемого сигнала [70, 71]. По сути, непрерывное (интегральное) вейвлет-преобразование по смыслу соответствует базиса  $e^{-it\omega}$  на Фурье гармонического преобразованию заменой с вейвлетный  $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ ,

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \ a, b \in R, a \neq 0$$
(2.3)

Солитонообразные функции вида  $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ , применяющиеся в качестве базисов в данном преобразовании, называются вейвлетами (wavelet – маленькая волна) [72]. В данном случае, a – это временной масштаб вейвлета, измеренный в единицах, обратных частоте. Его аналогом в Фурье-анализе является период (частота) гармонического колебания. А b – это временное смещение (сдвиг) вейвлета по сигналу, измеренное в единицах времени. Этот параметр не имеет аналога в Фурье преобразовании.

Основными свойствами вейвлетов являются [73]:

- Локализация в частотном и временном пространстве
- Нулевое среднее:  $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0;$  (2.4)
- Ограниченность:  $\int_{-\infty}^{\infty} (|\psi(t)|)^2 dt < 0; \qquad (2.5)$

• Самоподобие (автомодельность) базиса – все вейвлеты базиса получаются из материнского посредством изменения значений параметров масштаба и сдвига.

Существует множество вейвлетообразующих функций, подходящих для обработки различных типов сигналов. Они описаны во множестве работ, например [31, 70, 71, 73]. Выбор базисной функции для анализа конкретного сигнала производится в зависимости от характера исходного временного ряда. Это обстоятельство является недостатком вейвлет-анализа, так как снижает его универсальность.

В данной работе, для первичного выявления периодичности в сигнале магнитограмм, в качестве базисной функции используется вейвлет Морле, который является комплексной функцией и представляет собой плоскую волну, модулированную гауссианой единичной ширины:

$$\psi(t) = \exp\left(j2\pi k_0 t\right) exp\left[\frac{-t^2}{2}\right],$$
 где  $k_0$  – параметр. (2.6)

Фурье-образ такого вейвлета представляет собой

$$\Psi(f) = \Theta(f) exp\left(\frac{-(f-k_0)^2}{2}\right), \qquad (2.7)$$

где  $\Theta(f)$  – функция Хевисайда (функция единичного скачка).  $\Theta(f) = 0$  при f < 0и  $\Theta(f) = 1$  при f > 0.

С увеличением параметра  $k_0$  возрастает угловая избирательность базиса, но ухудшается пространственная. В данной работе используется вейвлет Морле 6 порядка. Т.е. параметр в данном случае  $k_0 = 6$ .

На Рисунке 11 представлена вещественная часть и Фурье-образ вейвлета Морле 6 порядка.



Рисунок 11 – Временное (слева) и спектральное (справа) представление вейвлета Морле шестого порядка

Для применения вейвлет-преобразования с вейвлетом Морле в качестве базиса, в данной работе был использован хорошо известный алгоритм Торренса и Компо, описанный в работе [31].

На Рисунке 12 представлен пример результата вейвлет-анализа для объекта номер 45 из Таблицы 2b.



Рисунок 12 – а) Нормированный временной ряд магнитного поля; b) Вейвлетспектр; c) Глобальный вейвлет-спектр

Доверительный интервал вейвлет-спектра выделен с помощью «конуса влияния», который учитывает ошибки, появляющиеся на границах вейвлетспектра. Вне этих границ спектр рассчитывается путём дополнения временного ряда достаточным числом нулей. Статистическая значимость глобального вейвлета определяется с помощью критерия  $\chi^2$ .

### 2.3 EMD-анализ

Рассмотренные методы анализа временных рядов обладают общим существенным недостатком – точность результатов напрямую зависит от выбора входных параметров метода: вида материнского вейвлета, ширины окна анализа и т.д. Этим обуславливается необходимость использования априорной информации о сигнале, которая, по сути, отсутствует в случае нестационарных сигналов магнитограмм. Кроме того, используемые базисные функции могут исказить сигнал и повлиять на результаты анализа.

Методы, подходящие для анализа нестационарных сигналов, до сих пор активно разрабатываются и совершенствуются [74]. В данной работе для более детального анализа сигнала магнитограмм используется преобразование Гильберта-Хуанга (Hilbert–Huang transform / HHT), описанное Хуангом в работе [26]. Стоит отметить, что аналогичное преобразование на год раньше было предложено Наговицыным в работе [25]. Данное преобразование не использует искусственно вводимых базисных функций. В его основе лежит разложение исследуемого сигнала на эмпирические компоненты, с последующим изучением каждой из них. В основе ННТ лежит эмпирическая модовая декомпозиция ряда (Empirical Mode Decomposition / EMD).

ЕМD представляет временной ряд U(t) как аддитивную смесь (сумму) его характеристических компонент  $C_{d}(t)$  (колебательных мод) и остаточного ряда

 $R_n(t)$ . Здесь и далее, используя термин «колебательная мода», мы будем иметь в виду intrinsic mode functions (IMF) – эмпирические моды/внутренние колебания. Эти моды и являются базисными функциями, которые, вообще говоря, могут и не быть ортогональными друг другу. Но при этом набор таких мод адаптивен и опирается лишь на данные исходного сигнала, не внося дополнительных искажений. Таким образом, базис определяется самим временным рядом, а не выбором метода и алгоритма обработки и отдельных его параметров.

Характеристические компоненты EMD по сути своей аналогичны гармоническим функциям, использующимся в анализе Фурье или вейвлетам. Однако при этом они могут иметь амплитудную и частотную модуляцию, что является немаловажным при анализе нелинейных нестационарных сигналов. Метод поиска таких компонент заключается в следующем [26, 74]:

- Выявляются все локальные экстремумы исследуемого временного ряда.
- С помощью сплайнов интерполяции вычисляются верхняя и нижняя огибающие, которые проходят через все максимумы и минимумы соответственно.
- Вычисляется и вычитается из исходного ряда среднее значение огибающих
   M: U(t) M = R.
- Производится проверка критерия отсеивания, обусловленного ограничениями для внутренних мод, установленными Хуангом
   1. Число экстремумов и число нулей функции равны или отличаются на

1. Число экстремумов и число нулеи функции равны или отличаются на единицу.

2. Среднее арифметическое значение верхней и нижней огибающих кривых равно нулю.

При невыполнении критерия, принимается U(t) = R и повторяются предыдущие этапы алгоритма.

Полученный после отсеивания остаток *R* считается найденной колебательной модой *C<sub>i</sub>(t) = R*, где *i* - номер компоненты.

- После этого из исходного ряда вычитается найденная колебательная мода.
   Для остатка производится декомпозиция по вышеописанной схеме. Так происходит до тех пор, пока следующий остаточный временной ряд не окажется монотонной функцией или не удовлетворит определённым заданным условиям.
- Полученный на последнем шаге данного алгоритма ряд, является остаточной компонентой.

Так как декомпозиция должна быть конечной, также необходим и некоторый останавливающий критерий. На данный момент оптимальным признано простое ограничение на число итераций. Подробное описание и сравнение различных остановочных критериев приводится в работе [75].

Метод ЕМD сам по себе является мощным инструментом анализа временных рядов. Он успешно применялся в ряде работ для анализа различных колебательных явлений, наблюдаемых на Солнце. Например, с помощью ЕМD были: обнаружены ангармонические и мультимодальные структуры солнечных квазипериодических пульсаций (QPP) [29, 76, 77]; получена детальная двумерная информация волнах в корональной петле [78]; исследованы периодичности, связанные с 11-летним солнечным циклом [79, 80, 81], а также с более короткими циклами, наблюдаемыми в изменении солнечной активности [82]; также исследовалась периодичность изменения солнечного радиуса [83]. Кроме того, с помощью ЕМD была изучена периодичность среднемесячной энергии выбросов корональной массы [84], а также периодичности в длинных рядах изменения среднесуточного коронального индекса [85].

После декомпозиции ННТ предполагает изучение компонент с помощью построения Гильбертова спектра. Подробно преобразование Гильберта описывается в работах [26, 67, 75]. В данной работе, для исследования сигналов магнитограмм использовался только усовершенствованный метод EMD, без применения к полученным результатам преобразования Гильберта.

Выявленным недостатком оригинального EMD является проблема смешивания мод (mode mixing). Эта проблема была показана во множестве работ [86, 87, 88, 89] и возникает в сильно зашумлённых временных рядах. Метод, призванный устранить эту проблему, получил название эмпирическая модовая декомпозиция по ансамблю – Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) [90]. В ходе его реализации к исходному сигналу перед его декомпозицией добавляется фиксированный процент белого шума. Этот шаг повторяется N раз, после чего все результаты усредняются. Введение в сигнал белого шума с известными параметрами, как ни парадоксально, помогло значительно снизить эффект смешивания мод. В то же время, метод EEMD не лишен недостатка, проявляющегося в большой разнице между энергией исходного временного ряда и временного ряда, полученного при сложении всех выделенных колебательных мод. Данный недостаток практически полностью устраняется в следующей модификации метода, названной Complementary EEMD (CEEMD), который сходным с EEMD образом разлагает на эмпирические моды сигнал с N различными реализациями шума, но здесь результаты усредняются после того, как каждая компонента найдена. CEEMD решает проблему смешивания мод и обеспечивает восстановление входного сигнала. CEEMD, тем не менее, существует ряд проблем, связанных с программной реализацией данного метода, связанных, в частности, с задачей оптимизации и уменьшения нагрузки на процессор.[91].

В данной главе для выявления периодов использовался гибридный подход, основанный на применении хорошо зарекомендовавшего себя вейвлет-анализа для выявления периодов и эмпирической модовой декомпозиции для снятия долгопериодических трендов. Для EMD-анализа на данном этапе использовался алгоритм, описанный в работе [91].

На Рисунке 13 представлен пример исходного временного ряда (панель а) и ряда с вычтенным долгопериодическим трендом (панель b).



Рисунок 13 – График зависимости максимума напряженности магнитного поля от времени для ФО № 45 Таблицы 2b: а) исходный; b) с вычтенным трендом.

# 2.4 Результаты обработки

В Таблицах 3а и 3b и 3c представлены результаты вейвлет-анализа 75 факельных образований, основные параметры которых описаны в таблицах 2a и 2b Главы 1. Нумерация во всех таблицах сквозная и номера объектов, представленных в таблицах 2a и 2b, соответствуют номерам объектов в представленных ниже таблицах 3a, 3b и 3c.

Для каждой из таблиц 3a, 3b и 3c:

- В столбце 2 указаны экстремальные значения магнитного поля за временной ряд.
- В 4 столбце указаны интервалы периодов колебаний среднего магнитного поля в контуре, определённых с помощью вейвлет-анализа.

- В 3 столбце находятся пиковые значения для этих интервалов. Пиковые значения периодов определялись с помощью построения глобального спектра мощности с уровнем значимости 95%.
- В столбце 5 содержатся значения длины временного ряда для каждого объекта в минутах.

В сигналах магнитограмм были обнаружены долгопериодические колебания с периодами от 30 до 260 минут (по пиковым значениям) или от 25 до 280 минут (по интервалам). Максимальные выявленные периоды колебаний, указанные в таблицах, минимум трижды укладываются в длину соответствующего временного ряда, что соответствует пределу вейвлета Морле-6.

Важно уточнить, что значения среднего магнитного поля в контуре, для которых были найдены вариации, являются, именно значениями напряжённости магнитного поля, т. е. поток, поделенный на площадь. Значения, приводимые в качестве максимального значения магнитного поля – есть напряжённость, приведённая к площади пикселя.

Стоит отметить, что временное разрешение инструмента SDO/HMI составляет 45 секунд, что позволяет детектировать и более короткие периоды. Действительно, в исследуемых сигналах были обнаружены и короткие колебания. Например, колебания с периодами 3-5 минут [3]. Подобные колебания часто наблюдаются в солнечной фотосфере, например, в факельных полях и являются наиболее исследованными. Их интерпретация связывается с распространением магнитогидродинамических волн [47].

Однако, в цели данной диссертации их изучение не входило. В таблицы результатов вошли только периоды колебаний более 25 минут.

Таблица За
------------

N₂	Экстрем. м. поле, Гс	Периоды колебаний (пик), мин	Периоды колебаний (интервалы), мин	Временной ряд, мин	
1	680	45, 100, 220	40–50, 80–120, 200–235	600*	
2	560	45, 100, 200	40-50, 70-120, 160-235	600*	
3	390	45, 70, 130	40-50, 60-80, 100-160	600*	
4	420	70, 120	40-80, 160-235	600*	
5	510	60, 140	40-80, 100-235	600*	
6	620	60, 130	50-70, 100-160	600*	
7	930	60, 110, 170,	50-70, 80-120, 140-235,	780*	
/	750	270	250-280	/ 00**	
8	460	90, 250	70-100, 235-280	780*	
9	480	80, 240	60-100, 200-250	780*	
10	530	130, 240	100-160, 235-280	780*	
11	420	50, 180	40-60, 120-200	780*	
12	540	100, 240	80-120, 200-280	780*	
13	-570	140, 260	120-200, 250-280	780*	
14	-600	100, 230	80-120, 200-250	780*	
15	-550	90, 160	70-100, 120-200	780*	
16	-570	60, 120	50-70, 100-130	780*	
17	-710	80, 170	70-100, 140-200	780*	
18	-380	100, 180	70-120, 140-235	780*	
19	700	130	100-200	780*	
20	430	60, 180	50-70, 140-235	780*	
21	520	50, 130	40-60, 110-160	780*	
22	560	60, 100, 220	50-70, 80-110, 210-240	780*	
23	560	90, 200	70-100, 170-230	780*	
24	540	35, 60, 120	25-40, 50-80, 100-140	780*	
25	480	50, 120, 200	30-60, 90-140, 180-240	780*	

T (	<b>^</b>	1
Гаолина	- 1	n
таолица	$\mathcal{I}$	U

N⁰	Экстрем. м. поле, Гс	Периоды колебаний (пик), мин	Периоды колебаний (интервалы), мин	Временной ряд, мин
26	520	80, 140	50-100, 120-235	780*
27	390	90, 250	70-100, 200-280	780*
28	-730	30, 110, 180	25-40, 10-120, 160-210	780*
29	-540	60, 100, 200	40-70, 80-120, 140-250	780*
30	-640	130	120-150	780*
31	440	40, 100	30-50, 80-120	702
32	470	70, 210	55-80, 180-240	780
33	1100	65, 150	60-80, 130-170	637
34	-840	100, 160	80-130, 140-180	1140
35	-730	40, 90	40-60, 70-100	488
36	-670	40, 70, 130, 260	30-50, 65-90, 110-140, 240- 280	900
37	-845	45, 65	35-55, 60-70	712
38	565	80, 140, 220	60-90, 120-160, 210-250	722
39	850	70, 130	60-80, 110-150	450
40	-840	40, 200	30-50, 160-220	600
41	-590	45, 80, 150	40-50, 65-100, 110-170	450
42	-640	60, 120, 250	50-65, 110-135, 230-270	1140
43	580	580 100, 180, 260 90-110, 140-200, 240-280		765
44	675	45, 90	40-55, 70-100	631
45	720	40, 120, 210	30-50, 100-130, 200-230	787
46	700	120, 200	110-130, 180-220	841
47	-645	65, 110, 200	55-70, 80-120, 180-240	645
48	-755	60, 120	50-65, 110-140	1020
49	-690	40, 70, 190	35-50, 65-80, 180-210	600
50	-490	75	60-90	555

Т	้อ	бт	пи	T	้ล	3	C
T	a	U,	III	ц	,a	$\mathcal{I}$	C

No	Экстрем. м. поле, Гс	Периоды колебаний (пик), мин	Периоды колебаний (интервалы), мин	Временной ряд, мин
51	-660	60, 110	50-75, 90-120	577
52	-715	70, 130	60-80, 120-140	712
53	-685	70, 190	50-100, 150-250	675
54	-455	70, 250	60-80, 230-270	510
55	-510	40, 100	35-50, 90-120	585
56	-680	40, 80, 220	35-55, 50-100, 200-250	652
57	525	65	50-80	555
58	550	40, 100	30-50, 70-140	652
59	730	30, 60, 130, 250	25-40, 40-80, 120-140, 220- 260	742
60	470	50, 130	40-60, 110-150	615
61	730	60, 130, 210	50-70, 120-140, 200-220	561
62	470	80, 150	70-90, 140-170	473
63	538	125	100-130	360
64	-567	75	50-80	300
65	-688	125, 255	80-130, 200-260	900
66	-565	90	80-100	300
67	-613	85, 205	60-100, 180-240	600
68	-551	30, 75 25-35, 60-80		300
69	290	30,75	25-35, 60-90	360
70	-543	50, 95, 215	40-60, 80-100, 200-300	600
71	711	175	160-190	720
72	772	90, 130, 250	80-100, 125-160, 180-270	780
73	614	65	50-70	360
74	528	125	100-160	480
75	-800	45, 140	40-50,130-180	540

На Рисунке 14 (панель а) представлена гистограмма пиковых значений максимальных значимых периодов колебаний магнитного поля ФО. При данном разбиении вероятностное распределение относительно равномерное с максимумами в интервалах 125-150 минут и 250-275 минут. На рисунке 14 (панель b) представлена аналогичная гистограмма для соответствующих частотных значений колебаний. Видно, что максимальное количество объектов приходится на диапазон ~ 4·10<sup>-5</sup> - 5·10<sup>-5</sup> Гц.



Рисунок 14 – Гистограмма а) максимальных периодов, b) минимальных частот колебаний

На Рисунке 15 представлено распределение максимального наблюдаемого периода колебаний среднего значения магнитного поля в зависимости от максимального по модулю значения магнитного поля для 75 факельных образований. Распределение обладает значительной дисперсией и небольшой тенденцией к увеличению максимального периода с ростом максимального абсолютного значения магнитного поля, что, по всей видимости, является следствием того, что для более мощных ФО время квазистабильной фазы жизни больше, соответственно большее наблюдаемое значение периодов колебаний можно принять значимым.



Рисунок 15 – Зависимость максимального наблюдаемого периода колебаний значения магнитного поля от максимального по модулю значения магнитного поля для 75 факельных образований. Уравнение линейной регрессии  $y = (0.04 \pm 0.05)x + (145.13 \pm 31.12);$  коэффициент линейной парной корреляции  $r_{xy} \approx 0.10 \pm 0.12$ 

2.5 Интерпретация долгопериодических колебаний магнитного поля ФО

В отличие от трёх и пятиминутных колебаний, подобные долгопериодические колебания трудно объяснить с помощью представлений о распространении МГД волн в солнечной атмосфере [3, 30].

Если взять, например, альфвеновскую скорость, равную скорости звука в фотосфере, 10 км/с, мы увидим, что магнитогидродинамическое колебание с периодом 180 минут (примерно 10 000 секунд) должно иметь длину волны около 100 Мм [27].

Опираясь на отсутствие выраженной зависимости между экстремальными значениями магнитного поля и максимальными периодами колебаний, а также на представленный в Главе 1 результат об отсутствии чёткой корреляции между магнитным полем и площадью ФО можно предположить, что магнитное поле не играет определяющей роли в появлении обнаруженных квазипериодических вариаций магнитного поля факельных образований. Данный результат может являться свидетельством того, что вариации в диапазоне периодов 25-280 минут являются «наведенными», обусловленными внешними колебательными воздействиями на наблюдаемые структуры.

Появляется вопрос о причинах возникновения наблюдаемых колебаний. В качестве «рамочной» интерпретации можно предложить следующее.

Предыдущие исследования показали, что в магнитном поле таких мелкомасштабных структур наблюдаются квазипериодические вариации, имеющие периоды от нескольких минут до пяти-шести часов [27, 54]. В работе [40] такие вариации (в пределах 25 минут) связывались с влиянием на исследуемые объекты всплытия ячеек грануляции. Интерпретация более длинных периодов (30-200 минут и более) до сих пор остается под вопросом. Так, в статье [27] длинные (80-230 минут) колебания ФО с растущими со временем амплитудой

и периодом объяснялись механизмом отрыва вихрей в турбулентной плазме солнечной атмосферы [92]. В работе [35] подобные длинные периоды объяснялись влиянием всплытия ячеек супергрануляции. Но время всплытия ячеек супергранул составляет порядка тридцати часов и более, что много больше исследуемых периодов. К тому же, динамика супергранул сложна, и поле их скоростей имеет не только вертикальную, но и горизонтальную компоненту.

Кроме того, есть еще одно явление на Солнце – мезогрануляция со временем жизни отдельных элементов порядка десятков-сотен часов [93], и проявляется она как раз наиболее отчетливо в поле скорости. Может быть, в возбуждении колебаний ФО именно она играет большую роль.

Если предположить, что ФО с малыми магнитными полями состоит из пучка тонких магнитных трубок и имеет достаточно небольшую глубину под фотосферой, то оно в значительной степени взаимодействует с динамичными супергранулами и мезогранулами. Подобное предположение хорошо согласуется с выводом первой главы о наличии значительного эффекта проекции, влияющего на наблюдения. Так как «неглубокое» факельное образование, влекомое горизонтальными и вертикальными движениями, способно двигаться вокруг положения своего равновесия подобно прожектору, меняя при этом площадь своей физической проекции на картинную плоскость.

Более подробной интерпретации колебаний магнитного поля факельных образований посвящена **Глава 3** данной диссертации.

### Выводы Главы 2

 Исследованы долгопериодические колебания магнитного поля 75 факельных образований. Методика обработки данных разработана таким образом, чтобы минимизировать ошибки, связанные с неверным отождествлением каждого факельного образования в течение времени жизни. Для этого каждый объект исследовался индивидуально. Также исключены искажения, связанные с переходом экстремального отсчёта магнитного поля между соседними пикселями.

- Впервые обнаружены длинные периоды колебаний магнитного поля ФО.
   Значения периодов составили 25-280 минут. Значимость периодов определялась с помощью статистических критериев. Максимальный учитываемый в результатах период хотя бы трижды укладывается во временной ряд.
- Зависимость максимального наблюдаемого периода колебаний среднего значения магнитного поля от максимального по модулю значения магнитного поля показывает значительную дисперсию, что вкупе с результатами, полученными в Главе 1, может указывать на то, что магнитное поле не играет определяющей роли в появлении колебаний магнитного поля ФО.
- В качестве гипотезы Сделано предположение, что выявленные колебания ФО с долгопериодические малыми магнитными полями обусловлены воздействием образование внешним на факельное динамическими свойствами супергрануляции и мезогрануляции.

Глава 3. Анализ колебательных мод магнитного поля факельных образований

Данная глава посвящена более глубокому анализу природы колебательных мод, наблюдаемых во временных рядах изменения сигнала магнитограмм факельных образований. По итогам исследований, приведённых в Главах 1 и 2, было сделано предположение о том, что колебания магнитного поля ФО взаимодействием обусловлены их динамическим с супергранулами И мезогранулами на уровне фотосферы. Это предположение требует проверки и уточнения. Все изыскания необходимы для построения максимально адекватной модели факельного образования. На данный момент не существует общепринятой модели факельного образования, которая соответствовала бы всем наблюдаемым физическим характеристикам ФО. Трудность заключается в недостатке данных о физических параметрах ФО, таких как масса, температура на различных высотах, глубина залегания под фотосферой.

Большинство существующих теоретических моделей подобных мелкомасштабных структур представляют собой модели магнитных трубок с различным набором физических параметров (температуры, давления, плотности, напряженности магнитного поля), обычно принадлежащих факельным полям, или полярным факелам [94]. Однако, как было показано во **Введении** данной диссертации, в литературе понятия разнообразных мелкомасштабных структур часто путаются или вовсе не разделяются.

Одной из первых физических моделей факелов (факельных узлов) была модель «горячей стенки» [95]. В рамках этой модели факельные узлы представляются как вертикальные магнитные трубки, проникающие глубоко под фотосферу, в верхнюю часть конвективной зоны. Предполагается, что плотность плазмы в такой трубке резко уменьшается, и, таким образом, создается глубокая

Вильсоновская депрессия, которая, если смотреть на трубку под углом, позволяет видеть через прозрачную трубку факела более горячие слои фотосферы – так называемые «горячие стенки».

Эта модель до сих пор остаётся если не общепринятой, то самой популярной. Её используют, в том числе и для моделирования полярных факелов [96]. В работе [13], где были использованы данные со шведского наземного телескопа SVST. с пространственным разрешением 0.3". заявленным подтверждается предсказанный данной моделью закон изменения интенсивности излучения факельных узлов с изменением координаты от центра к лимбу. В работе [97], по данным космического аппарата SOHO/MDI с пространственным разрешением в 2", также делается вывод о справедливости модели «горячей стенки». Однако, например, в работе [20], основанной на данных шведского телескопа SST, имеющего пространственное разрешение 0,12", приводятся измерения, опровергающие и предполагаемый в модели размер факельного узла (порядка 100 км) и закон изменения контраста, относительно координат.

Более того, уже в 1984 году в работе [98] и позже в [99, 100] был подмечен существенный изъян модели горячей стенки. Дело в том, что, когда описанная в модели магнитная трубка наблюдается на лимбе, линия обзора наблюдателя проходит под прямым углом к оси радиально ориентированной магнитной трубки, и горячие стенки просто не видны в этой позиции. То есть, в соответствии с этой моделью факелы не могут наблюдаться на лимбе в принципе. Однако наблюдения показывают, что именно на лимбе факелы лучше всего видны в белом свете.

Второй наиболее известной моделью факельных узлов является так называемая «модель бугорков и облаков» ("hillock and cloud model") [99]. Согласно этой модели, факелы не связаны с магнитными структурами и обладают повышенной яркостью в основном за счёт подъема горячей субфотосферной плазмы, которая захватывается магнитными полями вблизи пятна. Предполагается, что этот вертикальный перенос горячей субфотосферной плазмы приводит к образованию горячих облаков, которые фактически наблюдаются как факелы. Эта модель, очевидно, плохо отражает природу факельных структур, так как факельные узлы наблюдаются не только около пятен, и поэтому может быть упомянута лишь по историческим причинам. Рисунок 16 иллюстрирует облачную модель факела.



Рисунок 16 – Облачная модель факелов [99]. Восходящие потоки ионов водорода направляются в слой нейтрального водорода. Эти ионы рекомбинируют экзотермически, высвобождая больше энергии и разгоняя потоки вверх и друг от друга, и появляется яркий холмик.

Важную роль в моделировании ФО играет численное моделирование их физических параметров. В настоящее время, численное моделирование мелкомасштабных структур проводится в рамках МГД, с заданными начальными и граничными условиями, и при определенном наборе известных физических параметров и начальной магнитной конфигурации объекта исследования. Зачастую, современные численные модели направлены на попытку воссоздать магнитные структуры, наблюдаемые между ячейками грануляции, время жизни которых не более 10 минут [101]. Такой подход обусловлен тем, что получаемые в процессе моделирования параметры плазмы структур полностью зависят от предполагаемой модели солнечной атмосферы и от выбора начальной конфигурации магнитного поля на фотосфере [102]. Включение сложной структуры магнитного поля в численную модель, и исследование его динамических свойств, требует, в свою очередь, достаточных компьютерных мощностей и минимизации численных ошибок, неизбежно появляющихся при длительном счете [103].

Пример статической 2D модели факела, как одиночной магнитной трубки представлен в работе [94]. Данная модель хорошо описывает мелкомасштабные структуры в факельных площадках, где магнитные поля могут достигать значений более 1500 Гс. Однако, модель не предоставляет данных о времени жизни такой структуры, ее устойчивости при более низких значениях магнитных полей, и о динамических свойствах.

С появлением новых наблюдательных данных с высоким как пространственным, так и временным разрешением появляется возможность уточнить существующие модели мелкомасштабных структур, и создать новую, динамическую модель уединенной магнитной структуры ФО, прослеживая эволюцию их физических параметров.

### 3.1 Анализ колебаний

В данной главе совершается переход от поиска квазипериодических колебаний магнитного поля факельных образований к более глубокому анализу наблюдаемых долгопериодических колебаний. В рамках исследования возможной природы длинных квазипериодических вариаций ФО, в данной работе был проведен анализ отдельных колебательных мод для временных рядов, характеризующих изменение магнитного поля указанных объектов в течение квазистабильной фазы их жизни.

Целью работы, приведённой в этой главе, являлось определение и детальное исследование внутренних колебательных мод магнитного поля факельных образований, оценка статистической значимости полученных мод с помощью усовершенствованных и новых методик проверки результатов на цветные шумы, а также предложение возможной интерпретации значимых мод и отдельных шумовых компонент.

Для более детального анализа долгопериодических колебаний, обнаруженных в сигнале магнитограмм факельных образований, а также для того, чтобы исследовать сигнал магнитограммы на наличие в нём цветных шумов, был использован метод, основанный на эмпирической модовой декомпозиции [25, 26], более подробно описанный в **Главе 2**.

Метод описан в работе [28]. Он основан на оригинальном ЕМD, с учётом выявленного поведения цветных шумов при эмпирической декомпозиции. Несмотря на присущий ЕМD недостаток, заключающийся в возможном смешивании мод, сравнение результатов декомпозиции, полученных для наших рядов с помощью методов ЕМD и СЕЕМD, не показало значительных различий при одинаковом количестве итераций. В работе [104] было показано, что белый шум при декомпозиции работает как двоичный фильтр (dyadic filter), т.е. частота каждой последующей шумовой моды оказывается в два раза меньше предыдущей. Также это выполняется для смеси детерминированного сигнала и шума. Аналогичное поведение было выявлено и для розового и красного шума [28]. Кроме того, подобно белому шуму [105], распределение спектральной энергий розового и красного шума может быть описано распределением  $\chi^2$ [28].

При обработке каждого объекта из тестовой группы факельных образований из сигнала магнитограмм было получено от 9 до 15 эмпирических колебательных мод.

65

#### 3.2 Анализ сигнала на наличие цветных шумов

Цветные шумы – это шумы, чья спектральная энергия распределена по степенному закону [104]:

$$S \sim \frac{1}{f^{\alpha}},\tag{3.1}$$

Где *S* – спектральная плотность мощности сигнала, а показатель степени  $\alpha$  – параметр, определяющий цвет шума. Значение  $\alpha$ =0 соответствует белому шуму,  $\alpha$ =1 соответствует розовому шуму,  $\alpha$ =2 – красному шуму.

При  $\alpha=0$  мы получаем белый шум – сигнал с равномерной спектральной плотностью на всех частотах. Белый шум является стационарным случайным процессом. В нашем случае он может быть как следствием случайных процессов, протекающих на Солнце, так и аппаратным, принадлежащим наблюдающему инструменту.

При *α*=1 получается розовый шум (мерцательный, фликкер-шум). Его спектральная энергия обратно пропорциональна частоте, то есть он равномерно убывает в логарифмической шкале частот.

Значение  $\alpha$ =2 соответствует красному (броуновскому) шуму. Его спектральная энергия пропорциональна  $\frac{1}{f^2}$  и убывает с частотой сильнее, чем у розового шума. Красный шум характерен для броуновского движения.

На Рисунке 17 показаны графики, иллюстрирующие закон распределения спектральной энергии для белого, розового и красного шумов.

Розовый и красный шумы, по всей видимости, не являются аппаратными. То есть причиной их возникновения служат естественные процессы, проистекающие в солнечной атмосфере. Тем не менее, мы можем проверить сигнал на наличие значимых колебательных мод, не принадлежащих цветным шумам.



Рисунок 17 – Законы спектрального распределения для белого, розового и красного шумов

Для исследования сигнала на наличие цветных шумов, каждом случае для каждого полученного набора мод были построены графики зависимости спектральной плотности мощности от среднего периода колебаний [106]. На Рисунке 18 показан пример подобного распределения. Колебательная мода считается значимой, когда её спектральная энергия лежит выше доверительных интервалов цветных шумов. На Рисунке 18 статистически значимая мода отмечена зелёным цветом. Доверительные интервалы для каждого вида шума были помощью моделирования определены с синтетических шумов, соответствующих закону распределения спектральной энергии [28]. Стоит отметить, что трендовая мода, показанная на Рисунке жёлтым цветом, всегда лежит выше доверительных интервалов цветных шумов, но, по очевидным причинам, значимой не является.



Рисунок 18 – Распределение спектральной энергии от среднего периода колебаний. Сплошными линиями показан доверительный интервал розового шума, пунктирными линиями – белого шума. Значимая мода находится выше доверительных интервалов шумов

Критерием для определения мод, принадлежащих к какому-либо цветному шуму, служил визуальный наклон распределения спектральной энергии.

Связь между энергией шумовых мод E и периодом P определяется соотношением, представленным в работе [28]:

$$EP^{(1-\alpha)} = const \tag{3.2}$$

Так, на Рисунке 18 расположение трёх мод с наименьшими периодами повторяет наклон спектра для белого шума. Моды с периодами в диапазоне от 10 до 80 минут хорошо ложатся на фитирующую линию внутри доверительного интервала розового шума.

Также, как упоминалось выше, моды, имеющие шумовую природу, имеют диадный характер [104] и распределение спектральной энергий розового и красного шума описывается распределением  $\chi^2$ [28].

Используемая методика сравнения спектров колебательных мод наблюдаемого сигнала со спектральным распределением цветных шумов, описанная в работах [28, 32], находится на стадии усовершенствования. Поэтому мы не можем с уверенностью утверждать, что все моды, попавшие в доверительный интервал того или иного шума, на самом деле не являются значимыми. Однако значимость колебательных мод, чьи спектральные энергии лежат выше доверительных интервалов шумов, сомнению не подлежит.

Рассмотрим ФО с относительно большим магнитным полем. Во всех исследованных случаях, где экстремальное магнитное поле превышало 500 Гс, было обнаружено по одной значимой моде одного из трёх типов [106]:

1) Период и амплитуда растут со временем;

2) Период и амплитуда уменьшаются со временем;

3) Режимы возрастания и убывания амплитуды и периода сменяют друг друга.

На Рисунках 19, 20 и 21 показаны примеры значимых мод каждого из трёх обнаруженных типов, наложенные на нормированный временной ряд среднего магнитного поля в контуре. Рисунок 19, иллюстрирующий статистически значимую моду первого типа, соответствует ФО с распределением спектральных энергий колебательных мод, представленных на Рисунке 18. Данный ФО соответствует объекту №7 из Таблицы 2а Главы 1 и Таблицы За Главы 2. Данный случай подробно описан в работе [32].

На распределении спектральных энергий колебательные моды с 1 по 7 и с 9 по 11 попадали в доверительные интервалы белого и розового шумов, а значимая мода демонстрировала раскачку по периоду с 80 до 230 минут и росла по амплитуде на фоне падения магнитного поля.



Рисунок 19 – Значимая мода 1 типа, наложенная на детрендированный нормированный временной ряд изменения магнитного поля

Во втором случае, представленном на Рисунке 20, значимая мода затухает с понижением периода с 80 до 30 минут, также на фоне падения магнитного поля. Данный объект соответствует объекту №39 в Таблице 2b и 3b Главы 1 и Главы 2 соответственно. Природа таких колебаний может быть объяснена, например, собственными колебаниями магнитного поля ФО, как это было показано для солнечных пятен [22, 44]. Однако за время жизни заметно меняется не только напряженность магнитного поля факельного образования, но и площадь, которую он занимает на магнитограмме, плотность заполнения объёма наблюдаемой структуры магнитными узлами и другие величины. Такие вариации параметров могут объясняться изменением жёсткости магнитной структуры, когда объект теряет со временем свою целостность. При этом его магнитное поле падает по величине, а период колебаний и амплитуда могут возрастать.



Рисунок 20 – Значимая мода 2 типа, наложенная на детрендированный нормированный временной ряд изменения магнитного поля

Вид значимых мод третьего типа, пример которых представлен на Рисунке 21, демонстрирует пакетный характер, так называемый «wave-train», когда участки, на которых период и амплитуда растут, чередуются участками с убыванием периода и амплитуды. Такие колебания, по всей видимости, имеют более сложную природу например, могут, являться следствием И возмущений квазипериодического влияния внешних на рассматриваемую структуру.

В случае, представленном на Рисунке 21, мода имеет средний период 65 минут, при этом значение магнитного поля данного объекта значительно падает со временем. Однако падение магнитного поля для появления колебаний 3 типа не является необходимым условием. В некоторых случаях оно оставалось практически неизменным в течение всего временного ряда. Мода, представленная на Рисунке 21, принадлежит объекту под номером 33 в таблице 2а Главы 1 и 3b Главы 2.



Рисунок 21 – Значимая мода 3 типа, наложенная на детрендированный нормированный временной ряд изменения магнитного поля

Для всех трёх типов выявленных статистически значимых колебательных мод характерна сонаправленность изменения амплитуды и периода. То есть с ростом амплитуды растёт период колебаний и наоборот. Представляет интерес выявление физического механизма, ответственного за появление подобных колебаний.

## 3.3 Модель магнитной структуры факела

На основе наших предыдущих изысканий и полученных знаний о физических и динамических свойствах факельных образований можно построить соответствующую наблюдениям модель магнитной структуры факельного образования и посчитать, будут ли характерны для неё долгопериодические колебания с наблюдаемыми периодами. Первый подход к описанию такой модели был сделан в работе [36].
В рамках данной модели мы будем пользоваться подходом, аналогичным применённому в работе [44] к солнечному пятну в модели мелкого пятна («shallow sunspot» model).

Действуя в предположении о ФО как о системе с переменной по времени эффективной жёсткостью (откликом системы на внешние возмущения), представим магнитную модель ФО как силовую магнитную трубку длины L и переменного радиуса a(z), что соответствует модели факельной структуры, представленной в [107]. Предположим, что заглублённое в подфотосферные слои факельное образование ограничено снизу уровнем Н, на котором уравниваются магнитное давление и давление конвективных турбулентных потоков. Ниже уровня Н силовые линии запутываются и не представляют собой единую динамическую систему. Глубина Н в зависимости от величины магнитного поля изменяется от нескольких сотен км до 1 Мм. Таким образом, высоту L можно оценить согласно [107] в 1-2 Мм. Пусть радиус a(z) в фотосфере и нижней хромосфере меняется слабо, а выше экспоненциально растёт. На уровне фотосферы из наблюдений можно оценить радиус таким же как у высоты На Рисунке 23 представлена порядковым значением 1-2 Мм. грубая схематическая модель ФО.



Рисунок 22 – схематичное изображение магнитной структуры ФО

Оценим характерные периоды колебаний системы в рамках такой модели. Колебательная мода, рассматриваемая в данном случае – изгибная (поперечная).

Пусть  $W^2(t)$  — жёсткость (эффективная упругость) системы, т.е. линейный коэффициент возвращающей силы, рассчитанный на единицу массы. Она имеет смысл обратного квадрата периода. Жёсткость системы определяется в основном магнитным полем. Градиент магнитного давления также имеет размерность силы, поэтому для жёсткости можно предложить следующую порядковую оценку:

$$W^2 \equiv \omega_0^2 \approx \frac{B^2}{8\pi L^2} \frac{\mathbf{v}}{\bar{\rho} \mathbf{v}}$$
(3.3)

Где  $\omega_0$  – эффективная частота системы,  $\frac{B^2}{8\pi}$  – магнитное давление, V – объём внутри трубки. В полученном выражении в качестве масштаба можно взять как высоту трубки, так и её радиус, поскольку в нашей модели эти величины одного порядка.

Таким образом, характерная частота получается:

$$\omega_0 = \frac{B}{L\sqrt{2}\sqrt{4\pi\bar{\rho}}} = \frac{\overline{V_A}}{L\sqrt{2}} \tag{3.4}$$

Где среднюю альфвеновскую скорость  $\overline{V_A}$  можно без значимой потери точности заменить на альвеновскую скорость на глубине *H*, так как основной вклад в плотность вносят самые нижние слои. А на уровне *H* согласно нашей модели  $V_A(H)$  будет равна скорости конвективных движений в фотосферных и подфотосферных слоях  $V_{CON}$ , которая зависит от глубины и в современных источниках оценивается величиной 0,5-1,0 км/с. В таком случае:

$$\omega_0 = \frac{\overline{V_A}}{L\sqrt{2}} \cong \frac{V_A(H)}{L\sqrt{2}} = \frac{V_{CON}}{L\sqrt{2}}$$
(3.5)

Поэтому для характерного периода будет справедлива оценка:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \frac{L\sqrt{2}}{V_{CON}} \cong \frac{9L}{V_{CON}}$$
(3.6)

$$T \cong \frac{9 \cdot 10^8}{10^5} = 9 \cdot 10^3 c = 2.5 \text{ часов}$$
(3.7)

Данная порядковая оценка хорошо согласуется с наблюдаемыми значениями периодов колебаний.

Полученная порядковая оценка периода собственных колебаний ФО хорошо соответствует наблюдаемым значениям долгопериодических колебаний магнитного поля ФО. Таким образом, мы можем попробовать решить обратную задачу и по наблюдаемому диапазону периодов оценить глубину под фотосферой, характерную для факельных образований.

Исходя из формулы (3.7) можно оценить скорость *V*<sub>CON</sub> для наблюдаемых периодов колебаний, которая зависит от глубины ФО.

Возьмём наблюдаемые периоды от 25 мин до 280 мин, характерные для колебаний магнитного поля ФО. Общую длину магнитной трубки *L* мы полагаем порядка 1 Мм.

В таком случае скорости будут в диапазоне ~5,4 $\cdot$ 10<sup>3</sup> м/с – 6 $\cdot$ 10<sup>4</sup> м/с.

Данные скорости, согласно численной модели конвективной зоны, представленной М. Стиксом в [108], характерны для глубины 300-400 км под фотосферой. Это и есть предполагаемая глубина ФО.

## 3.4 Выводы Главы 3

- Эмпирические колебательные моды, полученные методом Empirical Mode Decomposition, выделенные из временных рядов среднего магнитного поля ФО проанализированы на наличие в них цветных шумов. В случаях, когда максимальное магнитное поле ФО превышало по модулю значение 500 Гс, среди колебательных мод обнаруживалась статистически значимая мода, лежащая выше доверительных интервалов спектрального распределения цветных шумов.
- Для таких случаев выделено три типа значимых колебательных мод: 1) амплитуда и период растут со временем, 2) амплитуда и период затухают со временем, 3) режимы роста затухания амплитуды и периода последовательно сменяют друг друга.
- Описана модель магнитной структуры ФО, основанная на предположении о нижней границе ФО в подфотосферной области, по аналогии с моделью мелкого пятна.
- Согласно описанной модели, глубина факельного образования под фотосферой составляет 300-400 км.

## Заключение

В ходе работы над диссертацией были получены следующие результаты:

Был выделен надкласс мелкомасштабных объектов, наблюдающихся в солнечной фотосфере и хромосфере – факельные образования.

Исследовано 75 объектов, удовлетворяющих определению ФО.

Для уточнения их физических и динамических характеристик была разработана методика обработки данных, минимизирующая возможные ошибки отождествления и артефакты периодичностей. Проанализирована структурная эволюция факельных образований. Во времени жизни ФО выделена квазистабильная фаза, чья продолжительность для исследованных объектов составила от 5 до 19 часов.

Показана взаимосвязь между магнитным полем элементов и усилением яркости в УФ линиях над ними. Показано, что при большем значении максимального магнитного поля продолжительность квазистабильной фазы в среднем больше. Обнаружено магнитное подавление излучения в континууме для исследованных объектов в случае, когда сигнал магнитограммы превышал 400 Гс.

Показано, что магнитное поле ФО не зависит от долготы и при этом не наблюдается чёткой антикорреляции между полем в контуре и площадью этого контура, что позволяет сделать вывод о сложной структуре магнитного поля ФО и значительном влиянии эффекта проекции на результаты наблюдений.

В изменении среднего магнитного поля ФО были выявлены долгопериодические колебания с периодами в интервале 25-280 минут. Зависимость максимального наблюдаемого периода от экстремального значения магнитного поля обладает значительной дисперсией, что может указывать на то, что собственные колебания магнитного поля исследуемых структур не являются основной причиной возникновения длинных периодов колебаний. Основной вклад в наблюдаемые квазипериодические колебания ФО, могут вносить внешние динамические процессы, обусловленные движением мезогранул и супергранул на Солнце.

Эмпирические колебательные моды, составляющие сигналы магнитограмм, были проверены на принадлежность к цветным шумам. Для объектов с магнитным полем, превышающим 500 Гс было выявлено по одной статистически значимой колебательной моде одного из трёх типов:

1) Период и амплитуда растут со временем;

2) Период и амплитуда уменьшаются со временем;

3) Режимы возрастания и убывания амплитуды и периода сменяют друг друга.

Для таких, наиболее мощных факельных образований, по всей видимости, начинает иметь значимый вклад возвращающая сила магнитных трубок. По этой причине в их сигнале и наблюдаются значимые колебательные внутренние моды.

Описана модель магнитной структуры ФО, согласно которой, факельное образование, аналогично мелкому пятну, неглубоко залегает под фотосферой. Данная модель хорошо соответствует результатам исследований, представленных в диссертации. Согласно описанной модели, глубина факельного образования под фотосферой составляет 300-400 км.

В дальнейшем необходимо расширить статистику наблюдательных данных, чтобы уточнить полученные физические параметры ФО. Также необходимо получить другие параметры, такие как температура и её изменение, чтобы построить достаточно полную динамическую модель факельного образования. Это позволит лучше проникнуть в суть процессов, проистекающих на спокойном Солнце и даже в активных областях, так как считается, что элементы факельных площадок близки по свойствам к уединённым факельным образованиям, хотя степень этого родства ещё нуждается в уточнении. Кроме того, развитие темы, представленной в данной диссертации, поможет лучше понять суть процессов, господствующих на Солнце во время минимумов солнечной активности, на основе чего можно будет точнее предсказывать будущую солнечную активность.

				Таблица 4		
название	магнитное поле	размер	время жизни	активная область	спокойное Солнце	примечания
поры (pores)	>1.5 KFC	3-5 MM	до нескольких суток	>		вне межгранульного пространства
факельные узлы (facular knots)	1-1.4 KГC	250км- 1500км	Несколько часов	>		в межгранульном пространстве, только в факельных полях
микропоры (micropores)	>0.7 kFc	около 1 Мм	Несколько часов	>	>	присутствует Вильсоновская депрессия на всех широтах
факельные образования (facular formations)	0.4-1.1 кГс*	1,5-4 MM	0,2-1,5 суток		>	максимальное поле от 400 Гс, но в течение времени жизни может быть ниже
факельные гранулы (facular points)	1-2 kГc	<400 km	5-15 мин	>		находятся в межгранульном пространстве, встречаются как одиночные образования, а также группами в виде ленообразнах и кольцеобразных структур
яркие точки (network bright points)	1-2 kГc	~150 kM	5-50 мин		>	находятся в межгранульном пространстве
полярные факелы (polar faculae)	около 1 кГс	2-4 MM	от часа до нескольких суток		>	выше ±50° широты, 11-летний цикл в противофазе к пятенному
Значения, приведённ	ые в таблице	, взяты из рабо	ıτ:[7-9]; [20];[10	9-112].		

## Приложения

## Список литературы

[1] Scherrer P. H., Schou J., Bush R. I., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Sol. Phys. – 2012. – Vol. 275. – P. 207.

[2] Зеленый Л.М. Плазменная гелиофизика: коллективная монография / Л.М.
 Зеленый, И.С. Веселовский и др. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2008. – С. 672.

[3] Strekalova P. V., Nagovitsyn Yu. A., Riehokainen A., and Smirnova V.V. Longperiod variations in the magnetic field of small-scale solar structures // Geomagn. and Aeron. – 2016. – Vol. 56. – Is. 8. – P. 1052–1059.

[4] Schweizer M. On the identity of the solar faculae // Mont. Notices of the Royal Astr.Soc. – 1853. – Vol. 13. – P.171.

[5] Kobanov N., Chelpanov A., Pulyaev V. Negative flare in the HE I 10830Å line in facula // J. of Atm. and Solar-Terr. Ph. – 2018. – Vol. 173. – P. 50-56.

[6] Willson R. C. Solar Total Irradiance Observations by Active Cavity Radiometers //
 Sol. Phys. – 1981. – Vol. 74. – Is. 1. – P. 217-229.

[7] Topka K. P., Tarbell T. D., Title A. M. Properties of the Smallest Solar Magnetic Elements. I. Facular Contrast near Sun Center // Astrophys. J. – 1992. – Vol. 396. – P. 351.

[8] Muller R. Fine Structure of Photospheric Faculae // J. O. Stenflo (ed.), Solar Photosphere: Structure, Convection, and Magnetic Fields – 1990. – P. 85-96.

[9] Beckers J. M., Schröter E. H. The intensity, velocity, and magnetic structure in around a sunspot // K. O. Kiepenheuer (ed.), Structure and Development of Solar Active Regions. – 1968. – P. 178-186.

[10] Chelpanov A. A., Kobanov N. I., & Kolobov D. Y. Influence of the Magnetic Field on Oscillation Spectra in Solar Faculae // – Sol. Phys. – 2016. – Vol. 291. – P. 3329-3338.

[11] Kobel P., Hirzberger J., Solanki S. K. Discriminant analysis of solar bright points and faculae // Astron. and Astrophys. – 2014. – Man. No. 2 – Vol. 4. – P. 15

[12] Lawrence J. K., Topka K. P., Jones H. P. Contrast of faculae near the disk center and solar variability // J. of Geophys. Res., – 1993. – Vol. 98. – Is. A11. – P. 18911-18918

[13] Topka K. P., Tarbell T. D., Title A. M. Properties of the smallest solar magnetic elements. II. Observations versus hot wall models of faculae // Astrophys. J. – 1997. – Vol. 484. – P. 479-486.

[14] Chapman & Sheeley, The photospheric network // Sol. Phys. –1968. – Vol. 5. – Is.
4. – P. 442-461

[15] Bruzek A. Illustrated glossary for solar and solar-terrestrial physics //A. Bruzek and C. J. Durrant. – Dordrecht: Reidel. – 1977. – P. 204.

[16] Beckers J. M. and Schröter E. H. The Intensity, Velocity and Magnetic Structure of a Sunspot Region. I: Observational Technique; Properties of Magnetic Knots // Sol. Phys. –1968. – Vol. 4. – Is. 2. – P. 142-164.

[17] Tarbell T., Ferguson S., Frank Z. et al., High-Resolution Observations of Emerging Magnetic Fields and Flux Tubes in Active Region Photosphere // J. O. Stenflo (ed.), Solar Photosphere: Structure, Convection, and Magnetic Fields – 1990. – P. 147-152.

[18] Javaherian M., Safari1 H., Dadashi1 N. Statistical Properties of Photospheric Magnetic ElementsObserved by the Helioseismic and Magnetic Imager onboard the Solar Dynamics Observatory // Sol. Phys. –2017. – Vol. 292. – Is. 11. – Id. 164. – P. 15. [19] Kobanov N., Kolobov D., & Chelpanov A. Oscillations Above Sunspots and Faculae: Height Stratification and Relation to Coronal Fan Structure. // Sol. Phys. – 2015. – Vol. 290. – Is. 2. – P. 363-380.

[20] Berger T. E., Rouppe van der Voort L., & Löfdahl M. Contrast Analysis of Solar Faculae and Magnetic Bright Points // Astrophys. J. – 2007. – Vol. 661. – Is. 2. – P. 1272-1288.

[21] Kostik R., & Khomenko E. The possible origin of facular brightness in the solar atmosphere // Astron. and Astrophys. – 2016. – Vol. 589. – Id. A6. – P.7.

[22] Nagovitsyn Yu. A., Nagovitsyna E. Yu. Long-period oscillation processes in sunspot groups (ground-based and exoatmospheric observations) // Geomagn. and Aeron. – 2011. – Vol. 51. – Is. 8. –P.1049-1053.

[23] Schou J. & Larson T. P. Extending Global Helioseismic Measurements From MDI to HMI // AAS/Solar Physics Division Abstracts #42. – 2011. – Vol. 43. – Id. 16.05.

[24] Freij N., Dorotovič I., Morton R. J., et al. On the Properties of Slow MHD Sausage Waves within Small-scale Photospheric Magnetic Structures // Astrophys. J. – 2016. – Vol. 817. – Id. 44. – P. 10.

[25] Nagovitsyn Y.A. A nonlinear mathematical model for the solar cyclicity and prospects for reconstructing the solar activity in the past // Astron. Let. – Nov. 1997. – Vol. 23. – Is. 6. – P. 742-748.

[26] Huang N.E., Zheng S., Long S.R., et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. Soc. L. Ser. A. – 1998. – Vol. 454. – P. 903–995.

[27] Huang N. E. & Wu Z. A Review on Hilbert-Huang Transform: Method and Its Applications to Geophysical Studies // Rev. of Geophys. – 2008. – Vol. 46. – RG2006. – P. 23.

[28] Kolotkov D. Y., Anfinogentov S. A., & Nakariakov V. M. Empirical mode decomposition analysis of random processes in the solar atmosphere // Astron. and Astrophys. – 2016. – Vol. 592. – Id. A153. – P. 9.

[29] Kolotkov D. Y., Nakariakov V. M., Kupriyanova E. G., Ratcliffe H., & Shibasaki
K. Multi-mode quasi-periodic pulsations in a solar flare // Astron. and Astrophys. –
2015. – Vol. 574. – Id. A53. – P. 6.

[30] Riehokainen A., Strekalova P. V., Solov'ev A. A., Smirnova V. V., Zhivanovich I., Moskaleva A. V., Varun N. Long quasi-periodic oscillations of the faculae and pores // Astron. and Astrophys. – 2019. – Vol. 627. – Id. A10. – P. 7.

[31] Torrence C., Compo G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // Proc. R. Soc.
L. Ser. A. – 1998. – Vol. 79. – P. 61-78.

[32] Kolotkov D. Y., Smirnova V. V., Strekalova P. V., Riehokainen A., & Nakariakov V. M. Long-period quasi-periodic oscillations of a small-scale magnetic structure on the Sun // Astron. and Astrophys. – 2017. – Vol. 598. – Id L2.

[33] Стрекалова П. В., Смирнова В. В., Наговицын Ю. А., Соловьев А. А. Интерпретация Квазипериодических Колебаний Факельных Образований На Солнце // XVI Конф. Мол. Уч. «Взаимодействие полей и излучения с веществом», Труды. – 2019. – С. 109-111.

[34] Solov'ev A. A., Strekalova P. V., Smirnova V.V., Riehokainen A. Eigen oscillations of facular knots // Astrophys and Space Sci. – 2019. – Vol. 364. – Is. 2. – Id. 29. – P. 8.

[35] Стрекалова П.В., Наговицын Ю.А., Риехокайнен А., Смирнова В.В. Временные вариации магнитного поля солнечных факелов // Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика», Труды. – 2015. – С. 339-342.

[36] Solov'ev A. A., Smirnova V.V., Strekalova P. V., Long-term oscillations of solar facular knots // Astrophys. Bull. – 2020. – Vol. 75. – P. 176-181.

[37] Makarov V. I., Tlatov A. G., Callebaut D. K. Long-Term Changes of Polar Activity of the Sun // Sol. Phys. – 2004. – Vol. 224. – Is. 1-2. – P. 49-59.

[38] Костык Р. И. Что такое солнечные факелы? // Кинематика и физика небес. тел. – 2013. – Т. 29. – Номер 1.

[39] Avrett E. H., Loeser R. Models of the Solar Chromosphere and Transition Region from SUMER and HRTS Observations: Formation of the Extreme-Ultraviolet Spectrum of Hydrogen, Carbon, and Oxygen // Astrophys. J. Sup. Ser. – 2008. – Vol. 175. – Is. 1. – P. 229-276.

[40] Jess D. B., Verth G. Ultra-High-Resolution Observations of MHD Waves in Photospheric Magnetic Structures // Low-Freq. Waves in Space Plasm. Geoph. Monogr. Series. – 2016. – Vol. 216. – P.449-465.

[41] Norton A. A., Graham J. P., Ulrich R. K., et al. Spectral Line Selection for HMI: A Comparison of Fe I 6173 Å and Ni I 6768 Å // Sol. Phys. – 2006. – Vol. 239. – Is. 1-2. – P. 69-91.

[42] Lemen J. R., Title A. M., Akin D. J., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Sol. Phys. – 2012. – Vol. 275. – Is. 1-2. – P. 17-40.

[43] Abramenko V. I., Carbone V., Yurchyshyn V., Goode P. R., Stein R. F., Lepreti F., Capparelli V. and Vecchio A. Turbulent Diffusion in the Photosphere as Derived from Photospheric Bright Point Motion // Astrophys J. – 2011. – Vol. 743. – Is. 2. – P. 9.

[44] Solov'ev A. A., Kirichek E. A. The sunspot—shallow or deep? // Geomagn. and Aeron. – 2014. – Vol. 54. – Is. 7. – P. 915-919.

[45] Gelfreikh G. B., Nagovitsyn Yu. A. Nagovitsyna E. Yu. Quasi-Periodic Oscillations of Microwave Emission in Solar Active Regions // Publ. of the Astr. Soc. of Japan. – 2006. – Vol. 58. – Is. 1. – P. 29-35.

[46] Abramov-Maximov V. E., Gelfreikh G. B., Shibasaki K., Quasi-periodic Oscillations of Solar Active Regions in Connection with Their Flare Activity - NoRH Observations // Sol. Phys. – 2011. – Vol. 273. – Is. 2. – P. 403-412.

[47] Kobanov N. I., Pulyaev V. A. Spatial Distribution of Oscillations in Faculae // Sol.
 Phys. – 2011. – Vol. 268. – Is. 2. – P. 329-334.

[48] Nagovitsyna E. Yu., Nagovitsyn Yu. A. Spatial Variations in Parameters of Quasi-Hourly Sunspot Fragment Oscillations and a Singular Penumbra Oscillator // Astronomy Letters. – 2002. – Vol. 28. – Is 2. – P.121-129.

[49] Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А. Исследование долгопериодических колебаний лучевых скоростей в пятне и вблизи солнечного пятна на разных уровнях фотосферы // Астрономический журнал. – 2007. – Т. 83. – No 5. - С. 450-460.

[50] Smirnova V., Efremov V. I., Parfinenko L. D., Riehokainen A., Solov'ev A. A. Artifacts of SDO/HMI data and long-period oscillations of sunspots // Astron. and Astrophys. – 2013. –Vol. 554. – Id. A 121.

[51] Nagovitsyn Yu. A., Rybak A. L., Nagovitsyna E. Yu. Magnetic field variations and spatial configurations of long-period sunspot oscillations according to the SOHO data // Geomagn. and Aeron. – 2012. – Vol. 52. – Is. 7. – P. 902-907.

[52] Solov'ev A., Kirichek E. Basic properties of sunspots: equilibrium, stability and long-term eigen oscillations // Astrophys and Space Sci. – 2014. – Vol. 352. – Is. 1. – P. 23-42.

[53] Bakunina I. A., Abramov-Maximov V. E., Lesovoy S. V., Shibasaki K., Solov'ev A. A., TikhomirovYu.V. Long period oscillations of microwave emission of solar active

regions: observations with NoRH and SSRT // IAU Symposium. – 2009. – Vol. 257. – P. 155-157.

[54] Martínez González M. J., Asensio Ramos A., Manso Sainz R., et al. Unnoticed Magnetic Field Oscillations in the Very Quiet Sun Revealed by SUNRISE/IMaX // Astrophys J. Letters. – 2011. – Vol. 730. – Is. 2. – Id. L37. – P. 5.

[55] Jess D. B., Mathioudakis M., Erdélyi R., Crockett P. J., Keenan F. P., Christian D.
J. Alfvén Waves in the Lower Solar Atmosphere // Science. – 2009. – Vol. 323. – Is. – 5921. – P. 1582.

[56] Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А. Исследование долгопериодических колебаний лучевых скоростей в пятне и вблизи солнечного пятна на разных уровнях фотосферы // Астрономический журнал. – 2007. – Т. 83. – № 5. – С. 450-460.

[57] Наговицын Ю. А., Наговицына Е. Ю. Долгопериодические колебания в активных областях Солнца: наблюдательные свидетельства // Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика», Труды. – 2008. – изд-во СПбГУ.

[58] Couvidat S., Schou J., Shine R. A., et al. Wavelength Dependence of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Sol. Phys. – 2012. – Vol. 275. – P. 285-325.

[59] Adams W. M., Tang F. Differential rotation of short-lived solar filaments. // Sol.
Phys. – 1977. – Vol. 55. – Is. 2. – P. 499-504.

[60] Snodgrass H. B. A Torsional Pattern in the Rotation of the Solar Magnetic Field //
 Bulletin of the Amer. Astron. Soc. – 1990. – Vol. 22. – P. 1233.

[61] Howard R. F., Harvey J. W., Forgach S. Solar Surface Velocity Fields Determined from Small Magnetic Features // Sol. Phys. – 1990. – Vol. 130. – Is. – 1-2. – P. 295-311.

[62] Efremov V. I., Parfinenko L. D., &Solov'ev A. A. Investigation of Long-Period Oscillations of Sunspots with Ground-Based (Pulkovo) and SOHO/MDI Data // Sol. Phys. – 2010. – V267. – P. 279-293.

[63] Efremov V. I., Parfinenko L. D., Solov'ev A. A. Sunspot oscillations as derived from the SOHO/MDI magnetograms // Cosmic Research. – 2012. – Vol. 50. – Is. 1. – P. 44-55

[64] Zhivanovich I., Riehokainen A., Solov'ev A. A, Efremov V. I. Quasi-periodic oscillations of small-scale magnetic structures and a specific method for measuring the differential rotation of the Sun // Solar-Terr. Phys. – Vol. 5. – Is. 1. – P. 3-10.

[65] Efremov V. I., Solov'ev A. A., Parfinenko L. D., Riehokainen A., Kirichek E. Smirnova V. V., Varun Y. N., Bakunina I., Zhivanovich I. Long-term oscillations of sunspots and a special class of artifacts in SOHO/MDI and SDO/HMI data // Astrophys and Space Sci. – 2018. – Vol. 363. – Is. 3. – Id. 61. – P.

[66] Daubechies I. Ten lectures on wavelets. Society for industrial and applied mathematics // Philadelphia. – Pennsylvania. – 1992.

[67] Gabor D. Theory of Communication // J. Inst. Elect. Eng. – 1946. – Vol. 93. – P. 429-457.

[68] Ville J. Theorie et Applications de la Notion de Signal Analytique // Cables et Transmission. – 1948. – No. 2A. – P. 61-74.

[69] Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. // М: Мир. – 1983. – Т. 2. – С. 568.

[70] Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов // Учебное пособие. Изд. СПбГУ. – 2001.

[71] Новиков Л.В. Основы вейвлет-анализа сигналов // Учебное пособие. – 1999.

[72] Morlet J., Grossmann A. Sampling theory and wave propagation // Issues in Acoustic signal/Image processing and recognition. – 1983. – Vol. 1. – P. 233-261.

 [73] Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // УФН. – 1996. – Том 166. – № 11– С. 1145-1170.

[74] Сафиуллин Н. Т. дис. Разработка методики анализа временных рядов с помощью преобразования Хуанга-Гильберта канд. техн. наук. – Урал. фед. ун. им. пер. Презид. Росс. Б. Н. Ельцина. – Новосибирск. – 2015.

[75] Huang N. E. The Hilbert-Huang transform and its applications // Ed. By S. S. Shen. Interdisciplinary mathematical sciences. 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224: World Scientific Publishing Company Co. Pte. Ltd. – 2005.

[76] Nakariakov V. M., Inglis A. R., Zimovets I. V., Foullon, C., Verwichte E. Sych R.,
Myagkova I. N. Oscillatory processes in solar flares // Plasm. Phys. and Contr. Fus. –
2010. – Vol. 52. – Is. 12. – Id. 124009.

[77] Kolotkov D. Y., Pugh Chloe E., Broomhall A. M., Nakariakov V. M. Quasiperiodic Pulsations in the Most Powerful Solar Flare of Cycle 24 // Astrophys. J. Letters. – 2018. – Vol. 858. – Is. 1. – Id. L3. – P. 8.

[78] Terradas J., Oliver R., Ballester J. L. Application of Statistical Techniques to the Analysis of Solar Coronal Oscillations // Astrophys. J. – 2004. – Vol. 614. – Is. 1. – P. 435-447.

[79] Kolotkov D. Y., Broomhall A. M., Nakariakov V. M. Hilbert-Huang transform analysis of periodicities in the last two solar activity cycles // Mont. Notices of the Royal Astr.Soc. – 2015. – Vol. 451. – Iss. 4. – P. 4360-4367.

[80] Vecchio A., Laurenza M., Meduri D., Carbone V., Storini M. The Dynamics of the Solar Magnetic Field: Polarity Reversals, Butterfly Diagram, and Quasi-biennial Oscillations // Astrophys. J. – 2012. – Vol. 749. – Is. – 1. – Id. 27. – P. 10.

[81] Zolotova N. V., Ponyavin D. I. Synchronization in Sunspot Indices in the Two Hemispheres // Sol. Phys. – 2007. – Vol. 243. – Is. 2. – P. 193-203.

[82] Käpylä M. J., Käpylä P. J., Olspert N., Brandenburg A., Warnecke J., Karak B. B. Pelt J. Multiple dynamo modes as a mechanism for long-term solar activity variations Astron. and Astrophys. – 2016. – Vol. 589. – Id. A 56. – P. 24.

[83] Qu Zhi-Ning, Feng Wen, Liang Hong-Fei Periodicity of the solar radius revisited by using empirical mode decomposition and the Lomb-Scargle method // Res Astron. and Astrophys. – 2015. – Vol. 15. – Is. 6. – Id. 879.

[84] Gao Peng-Xin, Xie Jing-Lan, Liang Hong-Fei Periodicity in the most violent solar eruptions: recent observations of coronal mass ejections and flares revisited // Res Astron. and Astrophys. – 2012. – Vol. 12. – Is. 3. – P. 322-330.

[85] Deng L. H., Li B., Xiang Y. Y., Dun, G. T. Multi-scale analysis of coronal Fe XIV emission: The role of mid-range periodicities in the Sun-heliosphere connection // J. of Atmosph. and Solar-Terr. Phys– 2015. – Vol. 122. – P. 18-25.

[86] Huang N. E., Shen Z., Long R. S. A new view of nonlinear water waves – the Hilbert spectrum // Ann. Rev. Fluid Mech. – 1999. – Is. 31. – P. 417-457.

[87] Huang N. E., Long R. S. Normalized Hilbert transform and instantaneous frequency. – 2003. – NASA Patent Pending GSC 14,673-1.

[88] Veltcheva A. D., Soares C. G. Identification of the components of wave spectra by the Hilbert–Huang transform method // Appl. Ocean Res. – 2004. – Is. 26. – P. 1-12.

[89] Kaslovsky D. N., Meyer F. G. Noise corruption of Empirical Mode Decomposition and its effect on Instantaneous Frequency // Advances in Adaptive Data Analysis. – 2010. – Vol. 2. – Is. 3. – P. 373-396.

[90] Wu Z., Huang N. E. Ensemble Empirical Mode Decomposition: a noise assisted data analysis method // Advances in Adaptive Data Analysis. – 2008. – Vol. 1. – Is. 1. – P. 1–41.

[91] Torres M.E., Colominas M.A., Schlotthauer G., Flandrin P. A complete Ensemble Empirical Mode decomposition with adaptive noise // IEEE Int. Conf. on Acoust., Speech and Signal Proc. ICASSP-11. – 2011. – P. 4144-4147. – Prague (CZ).

[92] Nakariakov V. M., Melnikov V. F. Quasi-Periodic Pulsations in Solar Flares // Space Sci. Rev. – 2009. – Vol. 149. – Is. 1-4. – P. 119-151.

[93] Roudier Th., Malherbe J. M., Vigneau J., Pfeiffer B. Solar mesogranule lifetime measurements // Astron. and Astrophys. – 1998. – Vol. 330. – P. 1136-1144.

[94] Okunev O. V., Kneer F. Numerical modeling of solar faculae close to the limb // Astron. and Astrophys. – 2005. – Vol. 439. – Is. 1. – P. 323-334.

[95] Spruit H. C. Pressure equilibrium and energy balance of small photospheric fluxtubes // Sol. Phys. – 1976. – Vol. 50. – Is. 2. – P. 269-295.

[96] Quintero N. C., Suematsu Y., Ruiz C. B., Shimizu T. Asensio R. A. Analysis of spatially deconvolved polar faculae // Mont. Notices of the Royal Astr.Soc. – 2016. – Vol. 460. – Is. 1. – P. 956-965.

[97] Ortiz A., Solanki S. K., Domingo V., Fligge M., Sanahuja B. On the intensity contrast of solar photospheric faculae and network elements // Astron. and Astrophys. – 2002. – Vol. 388. – P. 1036-1047.

[98] Libbrecht K. G., Kuhn J. R A new measurement of the facular contrast near the solar limb // Astrophys. J. – 1984. – Vol. 277. – P. 889-896.

[99] Schatten K. H., Mayr H. G., Omidvar K., Maier E. A hillock and cloud model for faculae // Astrophys. J. – 1986. – Vol. 311. – P. 460-473.

[100] Wang H., Zirin H. The contrast of faculae near the solar limb // Sol. Phys. – 1987.
– Vol. 110. – Is. 2. – P. 281–293.

[101] Martínez-Sykora J., De Pontieu B., Carlsson M. et al. Two-dimensional radiative magnetohydrodynamic simulations of partial ionization in the chromosphere. II.

Dynamics and energetics of the low solar atmosphere // Astrophys. J. – 2017. – Vol. 847. – Is. 1. – Id. 36. – P. 17.

[102] Kraśkiewicz J., Murawski K., Musielak Z. E. Cutoff periods of magnetoacoustic waves in the solar atmosphere // Astron. and Astrophys. – 2019. – Vol. 623. – Id. A62.
– P. 9.

[103] Smirnova V., Konkol P. M., Solov'ev A. A., Murawski K. Numerical Simulations of Solar Spicule Jets at a Magnetic Null-Point // Sol. Phys. – 2016. – Vol. 291. – Is. 11. – P.3207-3216.

[104] Flandrin P., Rilling G., Goncalves P. Empirical Mode Decomposition as a Filter Bank // IEEE Signal Processing Letters. – 2004. – P. 112-114.

[105] Wu Z., Huang N. E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method // Proc. R. Soc. Lond. A. – 2004. – Vol. 460. – Is. 2046. – P. 1597–1611.

[106] Strekalova P. V., Nagovitsyn Yu. A., Smirnova V. V. Analysis of Oscillatory Modes of the Magnetic Field of Solar Facular Formations // Geomagn. and Aeron. – 2018. – Vol. 58. – Is. 7. – P. 893-898.

[107] Solov'ev A.A., Kirichek E.A. Structure of solar faculae. // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. – 2019. – Vol. 482. – Is. 4. – P. 5290-5301.

[108] Stix M. The sun: an introduction II // ed., by Michael Stix. – Astronomy and astrophysics library, Berlin: Springer. – 2004. ISBN: 3540207414

[109] Zwaan C. On the appearance of magnetic flux in the solar photosphere. // Sol. Phys. – 1978. – Vol. 60. – Is. 2. – P.213-240.

[110] Dunn R. B., Zirker J. B. The Solar Filigree. // Sol. Phys. – 1973. – Vol. 33. – Is. 2.
 – P.281-304.

[111] Dorotovič I., Sobotka M., Brandt P. N., Simon G. W. Evolution and motions of small-scale photospheric structures near a large solar pore. // Astron. and Astrophys. – 2002. – Vol. 387. – P. 665-671.

[112] Berger T. E., Rouppe van der Voort L. H. M., Lofdahl M. G. Observations of solar magnetic elements with 0.1" resolution. // Bulletin of the Amer. Astron. Soc. – 2004. – Vol. 36. – P. 686.