На правах рукописи

Стрекалова Полина Владимировна

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА СОЛНЦЕ

Специальность 1.3.1 – Физика космоса, астрономия
(физико-математические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (ФГБУН ГАО РАН)

Научный руководитель:
НАГОВИЦЫН Юрий Анатольевич
доктор физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН (ФГБУН ГАО РАН)

Официальные оппоненты:
КОБАНОВ Николай Илларионович
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,
ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИСЗФ СО РАН)

БАКУНИНА Ирина Альбертовна
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры математической экономики факультета экономики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики" (ФГАОУ ВО НИУ ВШЭ)

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук» (ФГБУН КрАО РАН)

Защита состоится «09» февраля 2024 года в 12 час. 45 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.021.01 Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, дом 65, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО РАН http://www.gaoran.ru/wp-content/uploads/2023/11/Dissertatsia_Strekalova.pdf

Автореферат разослан «09» января 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.021.01
кандидат физико-математических наук А. А. Осипова

Общая характеристика работы

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, размеры которых не превышают 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 квазипериодические колебания магнитного поля и других параметров мелкомасштабных образований [3]. Всестороннее изучение природы таких колебаний позволит проверить достоверность существующих моделей 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.

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 [4, 5, 6, 7]. 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) [8].

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 [9, 10].

Также в диссертации используются новые методы выявления цветных шумов, основанные на методе Empirical Mode Decomposition (EMD) [11, 12, 13, 14], и использующие генерацию искусственных шумов для определения доверительных интервалов [15]. 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. P. Strekalova, Yu. Nagovitsyn, A. Riehokainen, V. Smirnova. Long-period variations in the magnetic field of smallscale solar structures // Geomagnetism and Aeronomy, V. 56, Is. 8, pp.1052-1059, 2016
2. Kolotkov, V. Smirnova, P. Strekalova, A. Riehokainen, V. Nakariakov. Long-period quasi-periodic oscillations of a small-scale magnetic structure on the Sun // Astronomy & Astrophysics, V. 598, id. L 2, 4 pp., 2017
3. Strekalova P. V., Nagovitsyn Yu., V. Smirnova. Analysis of Oscillatory Modes of the Magnetic Field of Solar Facular Formations // Geomagnetism and Aeronomy, V. 58, Issue 7, pp.893-898, 2018
4. Solov’ev A. A., Strekalova P. V., Smirnova V.V., Riehokainen A. Eigen oscillations of facular knots // Astrophysics and Space Science, V. 364, Is. 2, id. 29, 8 pp., 2019

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 // Astronomy & Astrophysics, V. 627, id. A 10, 7 pp., 2019.
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 солнечно-земная 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 объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложений и списка литературы, включающего работы автора. Общий объем диссертации составляет 93 страницы, включая 22 рисунка, 7 таблиц. Список литературы содержит 112 наименований.

Краткое 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.

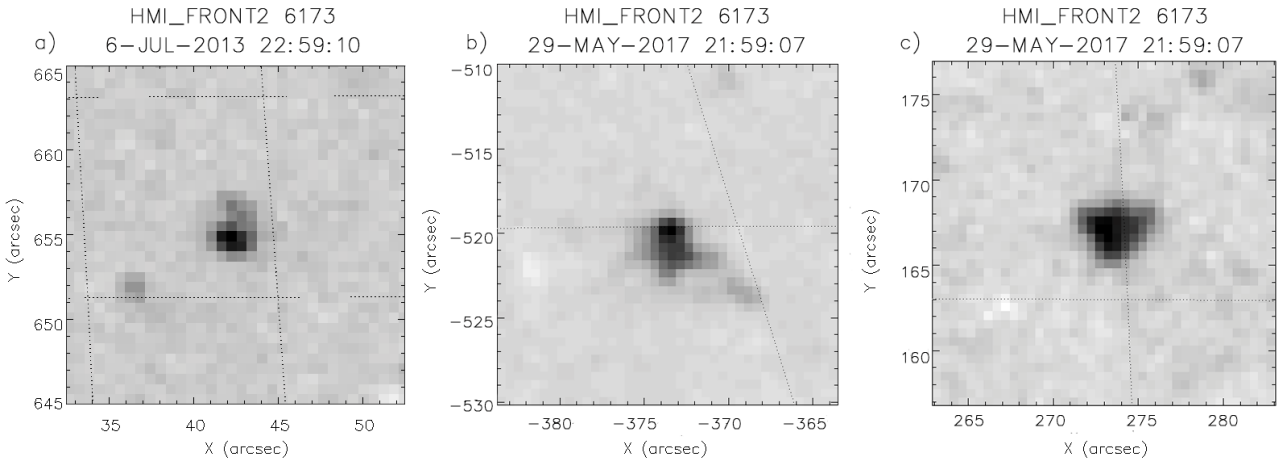

Рис.1. – Примеры магнитограмм типичных факельных образований по данным SDO/HMI. На момент съёмки абсолютное значение магнитного поля составляло: a) 315 Гс, b) 530 Гс, c) 580 Гс соответственно

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 [16]. 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 [17].

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 [18].

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 [14, 15, 18] 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 подфотосферных слоях [19].

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.

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. Long-period variations in the magnetic field of small-scale solar structures // Geomagn. and Aeron. (Engl. Transl.). – 2016. – Vol. 56. – Iss. 8. – P. 1052–1059.

4. Kobanov, N., Kolobov, D., & Chelpanov, A. Oscillations Above Sunspots and Faculae: Height Stratification and Relation to Coronal Fan Structure. // Sol. Phys. – 2015. – Vol. 290. – Iss. 2. – P. 363-380.

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

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

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

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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. & Astrophys. – 2019. – Vol. 627. – Id. A10. – P. 7.
17. Torrence, C., & Compo, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // Proc. R. Soc. L. Ser. A. – 1998. – Vol. 79. – P. 61-78.
18. 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.
19. Solov'ev A. A., Smirnova V.V., Strekalova P. V., Long-term oscillations of solar facular knots // Astrophys. Bulletin – 2020. – Vol. 75. – P. 176-181.