

*На правах рукописи*



**Живанович Иван**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ  
ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ**

Специальность 01.03.03 – Физика Солнца

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2022

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

**Научный руководитель:**

СОЛОВЬЕВ Александр Анатольевич  
доктор физико-математических наук,  
профессор, главный научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего лабораторией физики Солнца Федерального государственного бюджетного учреждения науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН)

**Официальные оппоненты:**

ЦАП Юрий Теодорович  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник лаборатории физики Солнца Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Крымская астрофизическая обсерватория» (КрАО РАН)

ТОПЧИЛО Николай Андреевич  
кандидат физико-математических наук,  
старший преподаватель математико-механического факультета Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук» (ФТИ им. Иоффе)

Защита состоится «27» мая 2022 г. в 12 час. 45 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук, по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, ГАО РАН, Пулковское шоссе 65/1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО РАН ([www.gaoran.ru](http://www.gaoran.ru)).

Автореферат разослан «27» апреля 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.120.01  
кандидат физико-математических наук

А. А. Осипова

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Стремительное развитие космических обсерваторий в течение нескольких последних десятилетий приводит к быстрому увеличению базы наблюдательных данных. Эти космические данные обладают высоким пространственным и временным разрешением в различных диапазонах наблюдаемого спектра (Domingo, Fleck, & Poland, 1995), (Pesnell, Thompson, & Chamberlin, 2012), (Schou, et al., 2012). Преимуществом космических данных является возможность получения длительных (до 5-6 дней) непрерывных рядов наблюдений тех или иных параметров активных солнечных образований, что необходимо для выявления и исследования долгопериодических колебательных процессов в пятнах, волокнах и факелах.

Одна из важных проблем физики Солнца – исследование солнечных пятен. Существование пятна, его эволюция и распад непосредственно обусловлены магнитным полем. До недавнего времени судить о структуре магнитного поля внутри тени солнечного пятна было проблематично вследствие недостаточного пространственного разрешения имевшихся наблюдений. С появлением космических солнечных обсерваторий, а также наземных телескопов с адаптивной оптикой, проблема с низким пространственным разрешением данных в известной степени была решена.

Важным этапом эволюции солнечного пятна является его диссипация. Наличие данных с высоким разрешением позволяет детальнее отследить на масштабе нескольких дней особенности изменения площади солнечных пятен во времени и уточнить существующие модели диссипации пятен.

Еще одно преимущество работы с данными космических обсерваторий высокого пространственного разрешения – это возможность исследовать мелкомасштабные структуры (факелы, спиккулы), наблюдаемые в разных диапазонах (например, данные в видимом диапазоне спектра, в линиях железа в ультрафиолете, магнитном поле и т.д.). Важным преимуществом таких структур является их более или менее равномерное распределение по поверхности Солнца, в отличие от солнечных пятен. К тому же, мелкомасштабные факельные структуры на Солнце присутствуют на диске независимо от фазы активности Солнца. Используя эти особенности мелкомасштабных элементов, можно получить для них кривую дифференциального вращения, для которой будет лучше статистическое наполнение в области экватора, где солнечных пятен практически нет. Сравнивая полученные скорости вращения мелкомасштабных магнитных структур, которые, судя по их динамике, захвачены супергрануляцией, с данными современной гелиосейсмологии (Howe, и др., 2000), можно получить независимую оценку

глубины залегания нижней границы суперконвективных ячеек.

Еще одной актуальной задачей является исследование связи между магнитным полем и яркостью темных областей пятен и факельных узлов. Несмотря на тот факт, что эффект подавления конвекции сильным вертикальным магнитным полем известен достаточно давно (Biermann, 1941), для его подтверждения нужны высококачественные наблюдательные материалы по магнитному полю и интенсивности, получаемые синхронно. Имеющиеся космические данные позволяют провести такое исследование. Таким образом, в физике Солнца существует ряд важных и актуальных вопросов, которые могут быть разрешены с использованием данных космических обсерваторий. Это новый инструментарий солнечной физики, открывающий широкие возможности физического исследования активных солнечных элементов.

### **Цели и задачи**

Основная цель данной диссертации состоит в исследовании магнитных структур различных пространственных масштабов на Солнце, особенностей их движений и внутреннего строения с использованием данных солнечных обсерваторий, таких как Solar Dynamics Observatory (SDO) (Schou, et al., 2012) и Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) (Domingo, Fleck, & Poland, 1995).

В первой части диссертации проводилось исследование движений мелко-масштабных магнитных структур (факелов) на спокойном Солнце для определения скоростей их дифференциального вращения. В качестве меры времени использовались периоды артефакта p2p (Efremov, и др., 2018). Сравнивая полученные скорости дифференциального вращения с угловыми скоростями вращения, которые дает гелиосейсмология (Howe, и др., 2000), можно диагностировать глубину залегания ячеек супергрануляции.

Во второй части диссертации описывается работа по установлению радиального профиля вертикального магнитного поля в тени солнечных пятен, как для одиночных пятен, так и пятен в составе биполярной группы. Сравнение полученных профилей показывает их значительное отличие.

Третья часть диссертации посвящена исследованию характера диссипации солнечных пятен. В модели диссипации магнитного поля солнечного пятна через тонкий граничный слой силовой трубки пятна должен иметь место эффект замедления темпа диссипации в пятнах с малой площадью тени. Этот эффект подтвержден по данным SOHO.

В последней, четвертой части диссертации, описывается явление насыщения эффекта подавления конвекции сильным вертикальным полем в солнечных пятнах. Впервые этот эффект был предложен в работе (Biermann, 1941) для объ-

яснения низкой температуры тени пятна. В диссертации найдено значение напряженности магнитного поля, при котором наступает эффект насыщения подавления конвекции. Для исследования выбирались солнечные пятна с сильным вертикальным магнитным полем. В факельных узлах магнитное поле более слабое, в них насыщения нет, но и для них связь яркости и магнитного поля выявляется при исследовании долгопериодических колебаний.

### **Научная новизна**

При исследовании кривой дифференциального вращения важно учитывать особенности тех способов обработки и тех трассеров, на основе которых эта кривая строится. Получаемые ранее кривые дифференциального вращения требовали длительных рядов наблюдений – несколько дней. Для описанного в диссертации метода определения скоростей дифференциального вращения достаточно серии наблюдений длительностью не более двух часов. В используемом методе в качестве меры времени были использованы периоды артефакта  $p2p$  (Efremov, и др., 2018). Суть самого артефакта заключается в том, что вследствие движения объекта в плоскости CCD-матрицы приемника наблюдается изменение интенсивности сигнала при переходе его максимального значения с пикселя на пиксель. Так как характерное время перехода с пикселя на пиксель составляет 3 – 10 минут, то для однозначного и достоверного отделения периодов артефакта достаточно использовать серии наблюдений длительностью 2 часа. В конечном итоге, полученное время, за которое трассер перемещается с пикселя на пиксель, нетрудно пересчитать в угловую скорость вращения трассера на Солнце. Имея обширный набор таких трассеров можно построить кривую дифференциального вращения Солнца.

Примененный метод наглядно показывает, что при использовании артефакта  $p2p$  в качестве индикатора скорости движения трассера можно получить достаточно надежные сведения о компоненте скорости движения объекта, которая лежит в картинной плоскости, за сравнительно небольшой промежуток времени. Сравнивая полученные скорости дифференциального вращения мелкомасштабных магнитных структур с угловыми скоростями вращения, которые дает гелиосейсмология (Howe, и др., 2000), и предполагая, что мелкомасштабные магнитные структуры захвачены ячейками супергрануляции, можно оценить глубину залегания суперконвективных ячеек.

Следующей частью диссертации является исследование диссипации солнечного пятна. Согласно моделям диссипации солнечного пятна через тонкий пограничный слой между трубкой магнитного потока солнечного пятна и окружающей средой (Solov'ev, 1976), (Solov'ev, 1991), скорость уменьшения площади тени солнечного пятна должна замедляться по мере уменьшения размера пятна

до некоторого критического уровня. Этот теоретический эффект был подтвержден по данным наземных наблюдений в работе (Соловьев & Кузнецова, 2005). В диссертации были использованы данные наблюдений космических обсерваторий, имеющих высокое пространственное и временное разрешение, для получения картины диссипации солнечных пятен. Полученные результаты в виде кривой изменения площади солнечного пятна с течением времени соответствуют теоретическим кривым, которые описаны в работах (Solov'ev, 1976), (Solov'ev, 1991).

При построении теоретических моделей солнечного пятна необходимо знать радиальное распределение магнитного поля внутри тени солнечного пятна. Такие распределения получались уже достаточно давно многими авторами по наземным наблюдениям, однако их результаты сильно различались между собой. Пространственное разрешение получаемых радиальных распределений магнитного поля в тени солнечного пятна было довольно низким, количество надежных точек в таком распределении невелико. При использовании данных космических обсерваторий эта проблема достаточно успешно решается. Полученный в диссертации радиальный профиль магнитного поля в тени солнечного пятна хорошо соотносится с теоретической моделью солнечного пятна, представленной в работе (Solov'ev & Kirichek, 2014).

В эволюции активных областей с биполярной группой пятен важную роль играет магнитная аркада, соединяющая два биполярных пятна. Вопрос о геометрии такой магнитной аркады весьма сложен в исследовании, но в то же время необходим для исследований активных областей в радиодиапазоне. Дело в том, что картина поляризации активной области при ее прохождении по диску существенно меняется просто из-за геометрического изменения угла наклона луча зрения, даже если никаких заметных физических процессов в этой активной области не происходит. Поэтому радиоастрономам важно четко отличать геометрические эффекты от физических, типа появления пекулярных радиоисточников. В диссертации представлены радиальные профили вертикальной компоненты магнитного поля для пятен биполярной группы. Были получены углы наклона этих профилей вдоль направления, соединяющего центры пятен в биполярной группе. Полученный наклон профилей важен для понимания геометрии магнитной аркады в активной области с биполярной группой.

В диссертации рассматривалась также зависимость интенсивности тени пятна в континууме от напряженности его магнитного поля. Найдено такое значение напряженности магнитного поля, при котором происходит эффект насыщения подавления конвекции.

### **Научная и практическая значимость**

1. Получено радиальное распределение вертикального магнитного поля в тени солнечного пятна. В случае с одиночным пятном распределение имеет симметричную, колоколообразную форму и допускает простое аналитическое описание. В случае биполярной группы отчетливо проявляется асимметрия распределения напряженности магнитного поля в пятнах вдоль линии, соединяющей центры солнечных пятен.

2. Для исследования радиального распределения вертикального магнитного поля в тени солнечного пятна была выбрана совокупность из 30 солнечных пятен правильной округлой формы, на стабильном этапе эволюции, попадающих под время работы космической обсерватории SDO. Данная подборка солнечных пятен может быть использована при исследованиях, важных для моделирования солнечных пятен.

3. Получена зависимость интенсивности в континууме в тени солнечного пятна от напряженности магнитного поля. Найдено такое значение напряженности магнитного поля, при котором интенсивность в континууме уже практически не меняется при дальнейшем нарастании поля, т.е. происходит насыщение эффекта подавления конвекции сильным полем. Данный результат важен для понимания природы охлаждения тени солнечного пятна.

4. По данным космических обсерваторий была подтверждена теоретически предсказанная фаза медленной диссипации солнечных пятен, сменяющая известную линейную стадию диссипации солнечного пятна.

5. В данных, полученных на дискретных приемниках излучения, присутствует артефакт  $p2p$ . На его основе, с использованием анализа Фурье получена кривая дифференциального вращения Солнца для мелкомасштабных факельных структур. Использование артефакта  $p2p$  и Фурье анализа дают хорошую возможность исследовать движения различных объектов по полю дискретного приемника излучения (при соблюдении требований к проявлению артефакта  $p2p$ ).

6. Был развит метод отделения периодов артефакта  $p2p$ , связанных с движениями объекта по матрице, и периодов собственных колебательных смещений факельных элементов.

7. Получена кривая дифференциального вращения мелкомасштабных магнитных факельных структур на Солнце, которые, судя по их динамике, захвачены сеткой супергрануляции. Эта сетка, благодаря наличию лептоклина в подфотосферных слоях, вращается несколько быстрее поверхностных слоев Солнца. Таким образом, полученные скорости дифференциального вращения необходимо сравнивать не со скоростями дифференциального вращения на поверхности Солнца, а с угловыми скоростями вращения Солнца на глубине

залегания ячеек суперконвекции. В рамках таких представлений получена оценка нижней границы ячейки суперконвекции – около 30 Мм.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. По данным космического аппарата SDO получен радиальный профиль вертикального компонента магнитного поля в тени одиночного солнечного пятна, а также и для пятен в биполярной группе пятен. Полученные профили имеют ожидаемые различия, а именно: для одиночных правильных пятен радиальный профиль магнитного поля имеет симметричную форму и допускает простое аналитическое описание, а в случае пятен в биполярной группе наблюдается значительная асимметрия магнитных профилей вдоль направления, соединяющего центры пятен в группе.

2. Впервые с помощью артефакта  $r2r$ , задающего независимый эталон частоты, построена кривая дифференциального вращения мелкомасштабных факельных магнитных структур, которая в целом совпадает с известными ранее результатами наземных наблюдений. При сравнении с данными гелиосейсмологии полученная кривая дифференциального вращения этих мелкомасштабных факельных трассеров, очевидно, захваченных сеткой супергрануляции, дает независимую оценку глубины залегания нижней границы супергрануляционных ячеек (около 30 Мм).

3. По данным SDO подтвержден эффект снижения темпа диссипации в малых солнечных пятнах, предсказанный моделью диссипация магнитного поля пятна через тонкий граничный слой (Solov'ev, 1991).

4. Получена зависимость интенсивности тени солнечного пятна от напряженности магнитного поля. Показано, что насыщение эффекта подавления конвекции в тени пятна вертикальным магнитным полем наступает при напряженности магнитного поля около 2300 Гс. Дальнейший рост напряженности поля не ведет к снижению эффективной температуры тени пятна.

### **Апробация работы**

Результаты, представленные в диссертации, докладывались на следующих конференциях:

- XIX всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2015» (5 – 9 октября 2015 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН)
- The 5<sup>th</sup> RadioSun Workshop and Summer School (23 – 27 мая 2016, České Budějovice, Czech Republic)
- XX всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2016» (10 – 14 октября 2016 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН)
- XXI всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2017» (9 – 13 октября 2017 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН)



- The XIV Finnish – Russian Radio Astronomy Symposium (5 – 7 сентября 2018 года, Tuorla Observatory, Finland)
- XXII всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2018» (8 – 12 октября 2018 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН)
- XXIII всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2019» (7 – 11 октября 2019 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН)

### **Публикации автора по теме диссертации**

#### Статьи в журналах из списка ВАК:

1. **Zhivanovich I.**, Solov'ev A. A., Smirnova V. V., RiehoKainen A., Nagnibeda V. G., Radial profile of sunspot magnetic field on the SDO data // *Astrophysics and Space Science.* – 2016. – Vol. 361. – article id. 102 – 6 pp.
2. 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 // *Astrophysics and Space Science.* – 2018. – Vol. 363. – Issue 3. – article id. 61– 14 pp.
3. **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-Terrestrial Physics.* – 2019. – Vol. 5. – Issue 1. – p. 5-16.
4. RiehoKainen A., Strekalova P. V., Solov'ev A. A., Smirnova V. V., **Zhivanovich I.**, Moskaleva A., Varun N., Long quasi-periodic oscillations of the faculae and pores // *Astronomy and Astrophysics.* – 2019. – Vol. 627. – id A10. – 7 pp.
5. **Zhivanovich I.**, Solov'ev A. A., Features of the slow dissipation of sunspots // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2020. – Vol. 59. – Issue 8. – p. 1056-1061.
6. **Zhivanovich I.**, Solov'ev A. A., Efremov V. I., Miller N. O., Relationship of the magnetic field and the brightness of the sunspot and the center of a facular knot // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2020. – Vol. 60. – Issue 7. – p. 865-871.
7. Efremov V. I., Solov'ev A. A., Parfinenko L. D., **Zhivanovich I.**, Anticorrelation of variations of the magnetic field of a sunspot and the brightness of its umbra in long-period sunspot oscillations // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2020. – Vol. 60. – Issue 7. – p. 1023-1027.
8. **Zhivanovich I.**, Solov'ev A. A., Efremov V. I., Data and estimation of the depth of superconvection cells // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2021. – Vol. 61. – Issue 7. – p. 940-948.

#### Труды и тезисы конференций:

1. Живанович И., Соловьев А. А., Смирнова В. В., Радиальный профиль напряженности магнитного поля в солнечном пятне по данным SDO/HMI //

Труды всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика-2015». – 2015. – с. 141 – 144.

2. Живанович И., Риехокайнен А., Ефремов В. И., Соловьев А. А., Дифференциальное вращение Солнца по данным SDO // Труды всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика-2016». – 2016. – с. 109 – 112.

3. Смирнова В. В., Лукичева М. А., Тлатова К. А., Рыжов В. С., Живанович И., Нагнибеда В. Г., Обработка данных радиотелескопа РТ-7.5 МГТУ им. Н. Э. Баумана для использования в моделировании миллиметрового излучения активных областей солнечной хромосферы // Труды всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика-2017». – 2017. – с. 293 – 296.

4. Живанович И., Ефремов В. И., Риехокайнен А., Соловьев А. А., Эффект  $r2p$  и его применение для исследования движения трассеров // Труды Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике. Астрофизика и физика Солнца. ИСЗФ. – 2018. – с. 15-18.

5. Живанович И., Соловьев А. А., Особенности медленной диссипации солнечных пятен // Труды всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика-2018». – 2018. – с. 169-172.

6. Живанович И., Осипова А. А., Стрекалова П. В., Иванов В. Г., Радиальный профиль магнитного поля солнечных пятен в рекуррентных группах // Труды всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика-2019». – 2019. – с. 165-168.

7. Живанович И., Соловьев А. А., Зависимость яркости тени солнечного пятна от напряженности его магнитного поля // Труды всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика-2019». – 2019. – с. 169-172.

8. Живанович И., Соловьев А. А., Распределение магнитного поля в ведущем и хвостовом солнечных пятнах // Труды всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика-2019». – 2019. – с. 173-176.

9. Живанович И., Соловьев А. А., Ефремов В. И., Дифференциальное вращение Солнца, данные гелиосейсмологии и оценка глубины ячеек суперконвекции // Труды всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика-2020». – 2020. – с. 101-104.

### **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в подборе данных наблюдений космических обсерваторий по критериям для задач, описанных в главах 1, 2, 3 и 4. Автором проводилась обработка данных, создание методик работы с данными для выполнения конкретных задач исследования, анализ полученных результатов и формулировка соответствующих выводов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (62 наименования). Объем работы составляет 109 страниц машинописного текста, включая список используемых источников, 45 рисунков и 4 таблицы.

### **Краткое содержание диссертации**

**Глава 1** диссертации посвящена исследованию дифференциального вращения Солнца по мелкомасштабным магнитным структурам. Исследования дифференциального вращения Солнца являются одной из классических задач физики Солнца, но примененный в диссертации метод имеет ряд особенностей и преимуществ. Во-первых, обычно дифференциальное вращение Солнца изучалось по наземным наблюдениям. Нами были использованы наблюдения космической обсерватории SDO [23]. В данных космических обсерваторий нет искажений, вызванных наличием турбулентности в атмосфере Земли. Кроме того, данные SDO обладают достаточно высоким пространственным разрешением, что позволяет использовать мелкомасштабные факельные структуры в качестве трассеров. Во-вторых, для исследования кривой дифференциального вращения Солнца по различным трассерам раньше требовались длительные ряды наблюдений, в течение многих дней и недель. Данные SDO имеют высокое временное разрешение, что позволяет используя артефакт  $p2r$  [10,11], строить кривую дифференциального вращения за 2 часа наблюдений.

Для достоверного определения артефакта  $p2r$  во временном ряду с экстремальной напряженностью магнитного поля в мелкомасштабных структурах использовался еще один временной ряд – с ходом горизонтальной координаты точки, имеющей экстремальное значение напряженности магнитного поля. Таким образом, при исследовании дифференциального вращения были получены 2 кривые – одна по временному ряду с координатой экстремального отсчета, вторая по временному ряду со значением экстремальной напряженности магнитного поля.

Для сравнения полученных кривых дифференциального вращения с кривыми других авторов использовалось представление в виде формулы (1):

$$\Omega = A - B \cdot \sin^2(\Theta) - C \cdot \sin^4(\Theta) \quad (1)$$

В формуле (1)  $\Omega$  – скорость дифференциального вращения,  $\Theta$  – широта,  $A$ ,  $B$  и  $C$  – коэффициенты, которые подбираются по наблюдениям. Обе кривые дифференциального вращения, которые были получены с использованием мелкомасштабных магнитных структур, хорошо соотносятся с известными кривыми дифференциального вращения [1, 14, 21, 24, 30], что показано на рис. 1, где представлены все перечисленные кривые дифференциального вращения.

Важным шагом было сравнение нашего результата с данными, которые дает гелиосейсмология [15]. Эти угловые скорости вращения на поверхности Солнца оказываются заметно ниже скоростей вращения, полученных нами по мелкомасштабным магнитным структурам (рис. 3).

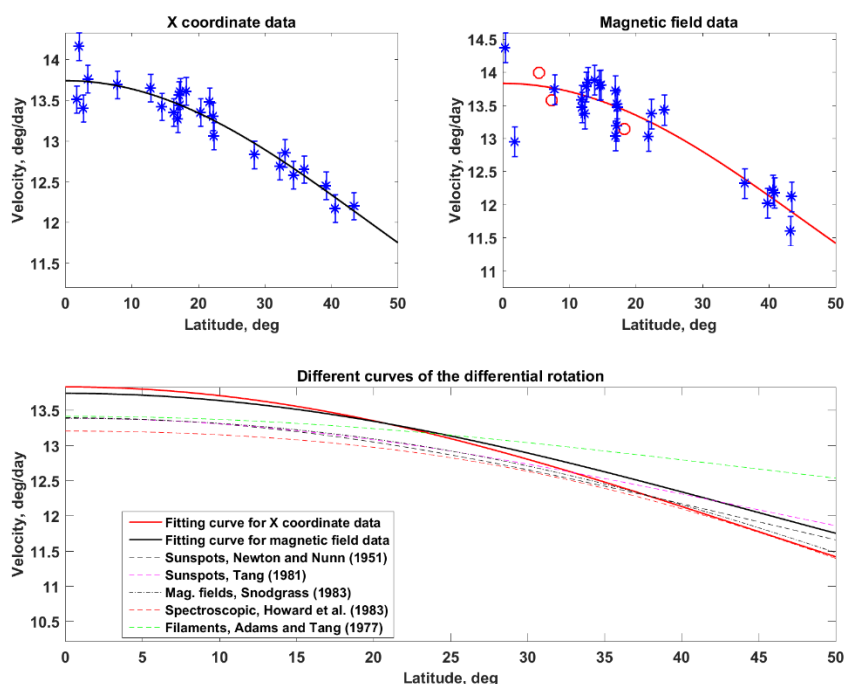


Рисунок 1. Дифференциальное вращение Солнца. По горизонтальным осям всех графиков отмечены широты от экватора в углах. По вертикальной оси показаны скорости вращения в градусах за сутки. На верхних двух панелях синими точками с барами ошибок представлены кривые дифференциального вращения, полученные по измерениям периода артефакта  $r2r$  у мелкомасштабных структур. Сплошными линиями на верхних панелях показано приближение в виде формулы (1). Красными точками показано несколько измерений скоростей дифференциального вращения Солнца по солнечным пятнам. Пунктирными линиями на нижней панели показаны приближения наблюдений в виде формулы (1), взятых из работ [1, 14, 21, 24, 30].

Для объяснения эффекта обратимся к картине распределения угловой скорости вращения Солнца с глубиной (рис. 2). У поверхности Солнца, в слое, который называют лептоклином, происходит резкое уменьшение скоростей дифференциального вращения. Благодаря этому конвективные ячейки супергрануляции вращаются быстрее, чем поверхностные слои Солнца. Мелкомасштабные магнитные структуры, судя по их наблюдаемой динамике, захвачены магнитной сеткой супергрануляции. Соответственно и вращение мелкомасштабных магнитных структур будет совпадать с дифференциальным вращением этой сетки. Для ячейки суперконвекции угловая скорость перемещения по диску Солнца определяется, по всей видимости, движением её наиболее плотной, нижней границы,

так что ячейка суперконвекции в целом будет двигаться по диску Солнца быстрее верхних, поверхностных слоев фотосферы Солнца, которые исследуются методами гелиосейсмологии.

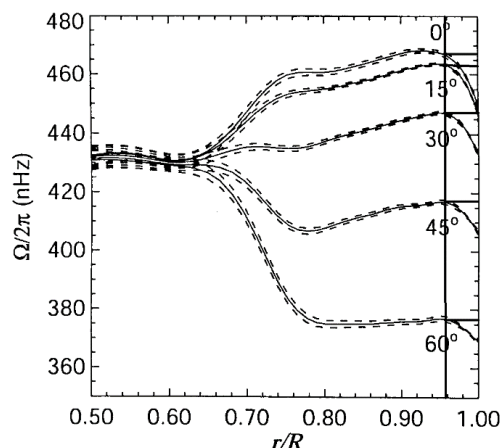


Рисунок 2. Распределение скоростей вращения слоев Солнца в зависимости от глубины и широты. По горизонтальной оси отмечено относительное расстояние от центра Солнца. Видно, что с глубины 0.6-0.7 радиусов Солнца происходит разделение линии на несколько направлений, зависящих от широты. Этот результат получен благодаря гелиосейсмологии [15]. Также вертикальной линией отмечена глубина 30 Мм, горизонтальными ответвлениями показаны соответствующие частоты дифференциального вращения на каждой широте.

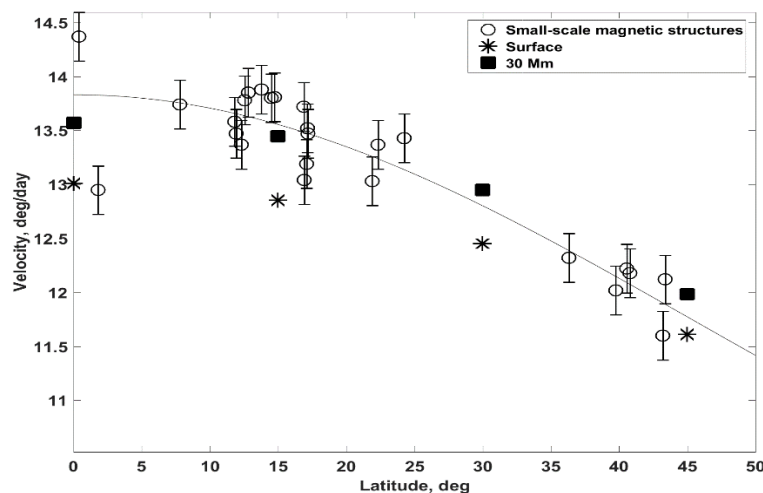


Рисунок 3. Кривая дифференциального вращения Солнца, полученная для мелкомасштабных магнитных структур с помощью частотного артефакта  $p_2r$  (показана точками с баром) и аппроксимацией в виде формулы (1). «Звездочками» показаны точки с угловыми скоростями вращения, полученные по данным гелиосейсмологии для поверхности Солнца, Черными квадратиками показаны угловые скорости вращения на глубине 30 Мм (по данным гелиосейсмологии).

В соответствии с гипотезой о захвате мелкомасштабных магнитных структур сеткой супергрануляции, их вращение должно совпадать с вращением

ячейки суперконвекции, точнее – ее нижней, наиболее плотной границы. Эти предположения позволяют оценить глубину залегания этой нижней границы ячейки супергрануляции. Оказалось, что для глубины около 30 Мм (показана вертикальной линией на рисунке 2) скорости дифференциального вращения, соответствующие этой глубине, совпадают со скоростями дифференциального вращения мелкомасштабных факельных структур. Этот результат показан на рисунке 3.

Далее в **главе 2** обсуждается распределение напряженности магнитного поля в солнечных пятнах, которое играет важную роль в понимании природы солнечных пятен. Для задачи моделирования пятен необходимо знать распределение магнитного поля в тени пятна. Предпринималось множество попыток построить распределения магнитного поля в солнечных пятнах [2, 4, 19, 26, 31], но единого представления о том, каков типичный профиль вертикального магнитного поля в тени пятна не сложилось. Вопрос в значительной мере оставался открытым.

Данные космических обсерваторий дают возможность исследовать магнитное поле пятна с достаточно высоким пространственным разрешением. В диссертации проведено сравнение радиального профиля поля, построенного по данным космических обсерваторий с распределениями, найденными по наземным наблюдениям. Для получения профиля магнитного поля были отобраны 30 солнечных пятен, имеющих правильную, почти симметричную форму, находящихся на момент наблюдений на видимом центральном меридиане Солнца. Для каждого из отобранных 30 солнечных пятен был построен усредненный радиальный профиль магнитного поля, полученный путем усреднения профилей вдоль выделенных радиальных сечений пятна. Затем все 30 профилей были усреднены и сведены в единый радиальный профиль магнитного поля в тени пятна. Подробные критерии отбора солнечных пятен, обработка наблюдений и анализ результатов, сравнение с аналитическими распределениями магнитного поля в солнечных пятнах представлены в работе [34] и описаны в диссертации.

Профиль вертикального поля в пятне удобно представить в виде суммы двух функций  $B_1$  и  $B_2$ :

$$B_z(r) = k \cdot B_1(r) + (1 - k) \cdot B_2(r) \quad (2)$$

Эти две компоненты описывают распределения магнитного поля внутри тени и полутени солнечного пятна соответственно. Коэффициент  $k$  показывает соотношение вклада двух компонент магнитного поля в общее радиальное распределение вертикальной компоненты магнитного поля  $B_z$ , принимая значения в диапазоне от 0 до 1. Эти распределения  $B_1$  и  $B_2$  имеют вид:

$$B_1 = \frac{B_0}{\left(1 + \left(\frac{r}{r_u}\right)^2\right)^{3/2}}, B_2 = B_0 \cdot J_0\left(\frac{r}{r_p}\right) \quad (3)$$

Здесь  $B_0$  является максимальным значением напряженности магнитного поля в тени солнечного пятна,  $r$  – абсолютное расстояние от центра солнечного пятна. Параметры  $r_u$  и  $r_p$  – это радиусы тени и полутени солнечного пятна соответственно. Описанное выше распределение магнитного поля в тени солнечного пятна было использовано для построения теоретической модели пятна [28]. Полученный профиль показан на рисунке 4. На данном рисунке точками с вертикальными барами ошибок показан наблюдаемый профиль напряженности вертикальной компоненты магнитного поля. Двумя кривыми показаны два аналитических распределения (формулы (2), (3) и (4)).

При работе с усреднением профилей разных пятен возникает вопрос – насколько сильно зависит распределение напряженности магнитного поля от его размеров? В диссертации описано второе аналитическое приближение, в котором радиус тени солнечного пятна (в формулах (2) и (3))  $r_u$  заменен на постоянное значение, а именно на значение глубины залегания солнечного пятна  $L = 4$  Мм. Такое значение глубины залегания пятна хорошо соответствует результатам локальной гелиосейсмологии [16-18, 33]. Аналогично можно заменить радиус полутени солнечного пятна на некоторое постоянное значение. Для этого можно использовать хорошо известное соотношение радиусов полутени и тени солнечного пятна  $r_p = 2.56 r_u$  [2]. В то же время, в работе [34], по выборке из 30 отобранных солнечных пятен было получено соотношение площади полутени и тени пятна, равное 2.48. Таким образом, аналитическое представление профиля пятна в виде (3) можно заменить представлением с постоянными значениями вместо переменных значений  $r_u$  и  $r_p$ :

$$B_1 = \frac{B_0}{\left(1 + \left(\frac{r}{4}\right)^2\right)^{3/2}}, B_2 = B_0 \cdot J_0\left(\frac{r}{2,48 \cdot 4}\right) \quad (4)$$

На рисунке 4 синей линией показано аналитический профиль (4). Как видим, разница профилей невелика, не выходит за пределы ошибок.

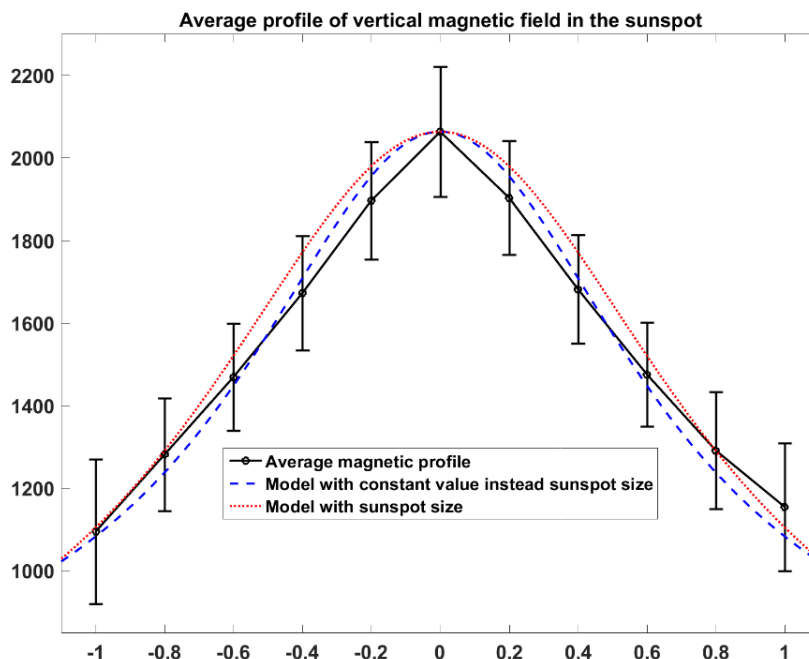


Рисунок 4. Радиальное распределение вертикальной компоненты напряженности магнитного поля в солнечном пятне. Точками с баром показан радиальный профиль магнитного поля по данным наблюдений SDO. Красная линия соответствует аналитическому распределению (2), (3). Синей линией показано распределение (2), (4).

Для моделирования солнечных пятен удобно использовать наблюдения одиночных пятен правильной, округлой формы. В то же время, помимо исследования распределения вертикальной компоненты магнитного поля в тени одиночного пятна необходимо его сравнить с аналогичным распределением для пятен из биполярной группы. Профиль магнитного поля правильной по форме пятна имеет симметричную, колоколообразную форму. В случае с биполярной группой пятен, в которой присутствует магнитная аркадная структура, ожидается появление асимметрии в распределении магнитного поля в самих пятнах. Как будет выглядеть асимметрия профиля магнитного поля пятна в биполярной группе? Куда будет наклонен профиль вертикальной компоненты магнитного поля? Ответы на эти вопросы весьма важны для исследования формы магнитной аркады в биполярных группах солнечных пятен.

В диссертации вопрос о распределении магнитного поля в биполярных группах пятен также был рассмотрен. Методика построения распределений магнитного поля в биполярных группах схожа с описанным методом для одиночных пятен. Однако есть существенное отличие – в случае биполярной группы нужно выбирать одно определенное направление (сечение), которое пройдет через центры (магнитные и геометрические, которые отстоят друг от друга на несколько



пикселей) двух пятен биполярной группы. Так было сделано для отобранных 7 биполярных групп солнечных пятен, которые наблюдались на SDO.

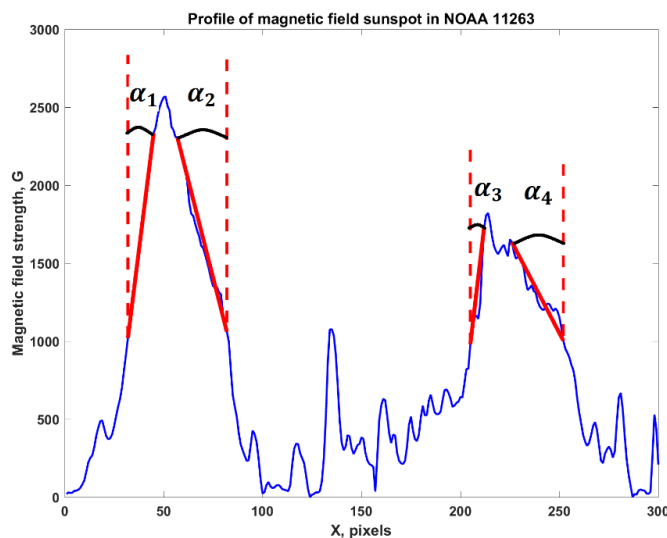


Рисунок 5. Распределение напряженности магнитного поля для биполярной группы пятен в активной области NOAA 11263, построенное вдоль направления, соединяющего центры солнечных пятен в этой группе.

Для группы пятен в активной области NOAA 11263 на рисунке 5 приведено распределение напряженности вертикальной компоненты магнитного поля. Углы  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  и  $\alpha_4$  определялись для определения асимметрии наклонов таких распределений. Подобные исследования углов наклона магнитной аркады проводились и ранее [32], но в данной диссертации применен совершенно отличный способ определения асимметрии профилей и углов наклона магнитной аркады. Однако остается еще один важный вопрос – для точного определения наклона магнитной аркады в биполярной группе пятен необходимо знать угол, под которым наклонена магнитная ось каждого из солнечных пятен биполярной группы относительно поверхности Солнца.

В главе 3 диссертации рассматривается ещё один важный для физики солнечных пятен вопрос о диссипации солнечного пятна. Рассмотрим некоторые модели диссипации солнечных пятен. В частности, в классической монографии [6] показано изменение магнитного поля и размера (площади) солнечного пятна в зависимости от времени. Однако в силу трудности непосредственных наблюдений изменений параметров солнечного пятна в ту эпоху результат, описанный в данной монографии, следует считать не наблюдательным результатом, а скорее лишь отражением тех качественных представлений, которые тогда были у исследователей. В такой модели уменьшение площади тени пятна представляется линейной зависимостью.

Другая модель диссипации солнечного пятна была предложена в работе [20]. Авторы данной работы применяли к солнечным пятнам фрактальную модель, в результате показывающую линейный характер диссипации солнечного пятна.

Задача о распаде пятна за счет омических потерь в масштабе радиуса всего пятна, когда его магнитное поле, расплываясь из начала координат в стороны, постепенно ослабевает, дает оценку времени жизни солнечного пятна порядка 300 лет [7,8], что резко расходится с картиной эволюции пятен.

Реальный процесс диссипации солнечного пятна выглядит таким образом:

- в начальный момент магнитный поток пятна не сосредоточен в начале координат с бесконечной плотностью;
- солнечное пятно не расплывается в стороны, как капля масла на бумаге, оно сохраняет четкие очертания, границы «тень-полутень» и «полутень-фотосфера», его площадь не растет, а уменьшается с течением времени;
- яркость и температура в тени пятна практически не меняется;
- напряжённость магнитного поля в центре пятна меняется слабо (в соответствии с эволюционной зависимостью, согласно которой напряжённость магнитного поля в малых пятнах систематически меньше, чем в крупных).

Эти важнейшие наблюдаемые особенности процесса диссипации солнечного пятна указывают на то, что магнитный поток в пятне уходит через тонкий граничный слой между магнитной силовой трубкой пятна и окружающей средой [12, 25, 27]. Этот тонкий пограничный слой автоматически поддерживается на боковой границе, поскольку фотосфера и конвективная зона постоянно поджимают силовую трубку пятна в радиальном направлении, сохраняя поперечный баланс давлений между холодной магнитной силовой трубкой пятна и окружающей более горячей средой. Такая модель тонкого граничного слоя предсказывает закон распада солнечного пятна, состоящий из двух фаз, а именно: линейная зависимость уменьшения площади тени должна смениться более медленной, скорость уменьшения площади тени пятна на последней стадии его диссипации должна резко замедлиться.

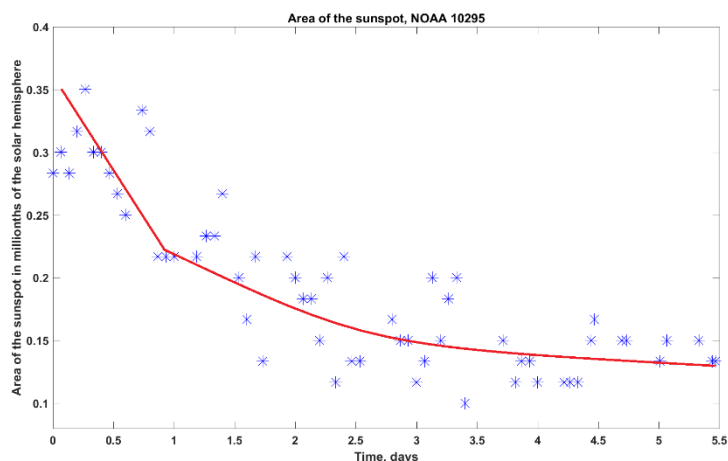


Рисунок 6. Распределение площади солнечного пятна в активной области NOAA 10295 в зависимости от времени. Красными линиями показаны 2 стадии диссипации солнечного пятна, что согласуется с рассматриваемой в диссертации моделью диссипации солнечных пятен.

В диссертации по специфическим критериям было отобрано 4 солнечных пятна из каталога данных обсерватории Дебрецена [3, 13] и для каждого из них отслежена зависимость площади тени от времени вплоть до исчезновения пятна. Пример одного из отобранных солнечных пятен, демонстрирующий замедление диссипации в малых пятнах, представлен на рисунке 6.

Следующая **глава 4** диссертации посвящена изучению зависимости интенсивности в континууме от напряженности магнитного поля в тени пятна. Понижение интенсивности (эффективной температуры) в тени солнечного пятна обусловлены тем, что сильное магнитное поле в тени солнечного пятна подавляет конвекцию. Таким образом, в такой области с сильным магнитным полем остается только лучистый перенос тепла, который слабее конвективного, что ведет к охлаждению плазмы в тени пятна до 3700-4000 К. Эта идея о подавлении конвекции сильными магнитными полями была впервые высказана в работе [5]. Таким образом, при увеличении напряженности магнитного поля интенсивность излучения тени уменьшается. Но температура (и как следствие, интенсивность) не может уменьшаться бесконечно. Возникает вопрос: при каких значениях напряженности магнитного поля пятна конвекция в нем будет подавлена настолько, что дальнейший рост поля уже не приводит к уменьшению температуры?

Установить наличие такого эффекта насыщения важно для подтверждения справедливости идеи Бирмана, а также для оценки того, насколько давление магнитного поля должно превосходить динамическое давление турбулентных пульсаций, чтобы конвекцию можно было считать полностью подавленной. Эта задача была выполнена по данным SDO. Основным критерий в выборе данных для

задачи: магнитограммы и интенсивограммы должны быть получены инструментом НМІ одновременно и обладать высоким пространственным разрешением. Для выполнения задачи были отобраны 22 солнечных пятна. В работе [35] для отобранных солнечных пятен строились усредненные радиальные распределения интенсивности и магнитного поля. Относительно центра солнечных пятен строились линии постоянного уровня интенсивности и магнитного поля, затем считался поток интенсивности и магнитного поля между соседними уровнями, площадь, занятую этими потоками, и среднее расстояние этой площадки от центра пятна. Таким образом, можно получить усредненное значение интенсивности и магнитного поля для построения профиля.

Следующим этапом построения зависимости магнитного поля и интенсивности является подбор точек из радиальных профилей интенсивности и магнитного поля на совпадающих с одинаковой точностью расстояниях от центра пятна. Таким образом получается пара значений магнитного поля и интенсивности. Так как для каждого пятна будет получаться несколько таких пар (количество пар зависит от размеров пятна, чем больше пятно – тем больше возможных пар), и, в конечном итоге, для подборки из 22 солнечных пятен, получена зависимость интенсивности от магнитного поля в солнечном пятне, показанная на рисунке 7.

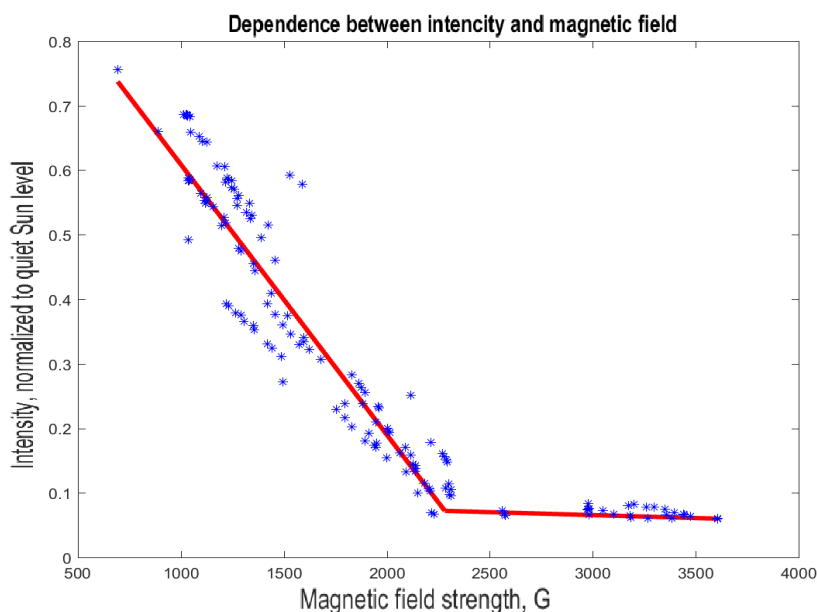


Рисунок 7. Зависимость интенсивности от напряженности магнитного поля в солнечных пятнах.

Как видно из рисунка, насыщение достигается при уменьшения интенсивности до постоянного значения на уровне чуть ниже 0.1 от интенсивности спокойной фотосферы Солнца при напряженности магнитного поля вблизи 2300 Гс.

## Список литературы

1. Adams, W., & Tang, F., Differential rotation of short-lived solar filaments // *Solar Physics*, 1977. – V. 55(2) – P. 499-504.
2. Allen, K. *Astrophysical Quantities* // Moskva: Mir, 1977. – 279 p.
3. Baranyi, T., Győri, L., & Ludmány, A., On-Line Tools for Solar Data Compiled at the Debrecen Observatory and Their Extensions with the Greenwich Sunspot Data // *Solar Physics*, 2016. – V. 291(9-10) – P. 3081-3102.
4. Beckers, J., & Schröter, E., The Intensity, Velocity and Magnetic Structure of a Sunspot Region. III: On the Origin of the Apparent  $\pi$  Component in Sunspot Umbrae // *Solar Physics*, 1969. – V. 10(2) – P. 384-403.
5. Biermann, L., Der gegenwärtige Stand der Theorie konvektiver Sonnenmodelle // *Vierteljahresschrift der Astronomischen Gesellschaft*, 1941. – V. 76 – P. 194-200.
6. Bray, R., & Loughhead, R., *Sunspots* // London: The International Astrophysics Series, London: Chapman & Hall, 1964. – 320 p.
7. Cowling, T., The growth and decay of the sunspot magnetic field // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1946. – V. 106 – P. 218.
8. Cowling, T., *Solar electrodynamics* // (изд. The Sun Edited by Gerard P. Kuiper). Chicago: The University of Chicago Press, 1953. – 573 p.
9. Domingo, V., Fleck, B., & Poland, A., The SOHO Mission: an Overview // *Solar Physics*, 1995. – V. 162(1-2) – P. 1-37.
10. Efremov, V. I., Parfinenko, L. D., Solov'ev, A. A., & Kirichek, E. A., Long-Period Oscillations of Sunspots Observed by SOHO/MDI // *Solar Physics*, 2014. – V. 289(6) – P. 1983-1998.
11. Efremov, V. I., Solov'ev, A. A., Parfinenko, L. D., Riehoainen, A., Kirichek, E. A., Smirnova, V. V., . . . Zhivanovich, I., Long-term oscillations of sunspots and a special class of artifacts in SOHO/MDI and SDO/HMI data // *Astrophysics and Space Science*, 2018. – V. 363(3) – 14 p.
12. Gokhale, M., & Zwaan, C., The Structure of Sunspots. I: Observational Constraints: Current Sheet Models // *Solar Physics*, 1972. – V. 26(1) – P. 52-75.
13. Győri, L., Ludmány, A., & Baranyi, T., Comparative analysis of Debrecen sunspot catalogues // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017. – V. 465(2) – P. 1259-1273.
14. Howard, R., Adkins, J., Boyden, J., Cragg, T., Gregory, T., Labonte, B., . . . Webster, L., *Solar Rotation Results at Mount-Wilson - Part Four – Results* // *Solar Physics*, 1983. – V. 83(2) – P. 321-338.
15. Howe, R., Christensen-Dalsgaard, J., Hill, F., Komm, R., Larsen, R., Schou, J., . . . Toomre, J., *Dynamic Variations at the Base of the Solar Convection Zone* // *Science*, 2000. – V. 287(5462) – P. 2456-2460.

16. Kosovichev, A. G., Subsurface characteristics of sunspots // *Advances in Space Research*, 2006. – V. 38 – P. 876-885.
17. Kosovichev, A. G., Photospheric and Subphotospheric Dynamics of Emerging Magnetic Flux // *Space Science Reviews*, 2009. – V. 144 – P. 175-195.
18. Kosovichev, A. G., Local Helioseismology of Sunspots: Current Status and Perspectives // *Solar Physics*, 2012. – V. 279 – P. 323-348.
19. Mattig, W., Die radiale Verteilung der magnetischen Feldstärke in normalen Sonnenflecken. Mit 2 Textabbildungen // *Zeitschrift für Astrophysik*, 1953. – V. 31 – P. 273.
20. Newton, H., & Nunn, M., The Sun's rotation derived from sunspots 1934-1944 and additional results // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1951. – V. 111 – P. 413.
21. Pesnell, W., Thompson, B., & Chamberlin, P., The Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Physics*, 2012. – V. 275(1-2) – P. 3-15.
22. Schou, J., Scherrer, P., Bush, R., Watcher, R., Couvidat, S., Rabello-soares, M., . . . Tomczyk, S., Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instruments on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Physics*, 2012. – V. 275(1-2) – P. 229-259.
23. Snodgrass, H., Magnetic rotation of the solar photosphere // *Astrophysical Journal*, 1983. – V. 270 – P. 288-299.
24. Solov'ev, A. A., On the problem of sunspot decay // *Byulletin Solnechnye Dannye Akademii Nauk USSR*, 1976. – P. 73-78.
25. Solov'ev, A. A., The Nonlinear Force-Free Magnetic Field and the Field Distribution above a Sunspot // *Astronomicheskii Zhurnal*, 1982. – V. 59 – P. 380-388.
26. Solov'ev, A. A., Area and Magnetic field of a Sunspot during Slow Dissipation // *Soviet Astronomy*, 1991. – V. 35(3) – P. 306-309.
27. Solov'ev, A. A., Sunspot magnetic structure and interspot radio source formation // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015. – V. 55(7) – P. 856-859.
28. Solov'ev, A. A., & Kirichek, E., Basic properties of sunspots: equilibrium, stability and long-term eigen oscillations // *Astrophysics and Space Science*, 2014. – V. 352(1) – P. 23-43.
29. Tang, F., Rotation Rate of High Latitude Sunspots // *Solar Physics*, 1981. – V. 69(2) – P. 399-404.
30. Wittmann, A., Computation and Observation of Zeeman Multiplet Polarization in Fraunhofer Lines. III: Magnetic Field Structure of Spot Mt. Wilson 18488 // *Solar Physics*, 1974. – V. 36(1) – P. 29-44.
31. Zagainova, I. S., Fainshtein, V. G., & Obridko, V. N., Leading and following sunspots: their magnetic properties and ultra-violet emission above them // *arXiv:1511.07229*, 2015. – 31 p.

32. Zelenyi, L. M., & Milovanov, A. V., Evolution of sunspots - The cluster model // Soviet Astronomy Letters, 1992. – V. 18 – P. 249.
33. Zhao, J., Kosovichev, A. G., & Duvall, T., Investigation of Mass Flows beneath a Sunspot by Time-Distance Helioseismology // The Astrophysical Journal, 2011. – V. 557(1) – P. 384-388.
34. Zhivanovich, I., Solov'ev, A. A., Smirnova, V. V., Riehoakainen, A., & Nagnibeda, V. G., Radial profile of sunspot magnetic field on the SDO data // Astrophysics and Space Science, 2016. – V. 361 – 6 p.
35. Живанович, И., & Соловьев, А. А., Зависимость яркости тени солнечного пятна от напряженности его магнитного поля // Сборник трудов конференции "Солнечная и солнечно-земная физика - 2019", 2019. – с. 169-172.
36. Соловьев, А. А., & Кузнецова, М. А., Уменьшение площади тени пятна на стадии регулярной диссипации // Труды IX Пулковской конференции по физике Солнца "Солнечная активность как фактор космической погоды", 2005. – с. 589-592.