

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

На правах рукописи

Парфиненко Леонид Данилович



**СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ
НА РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
МАСШТАБАХ**

Специальность 01.03.03 – Физика Солнца

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
ОБРИДКО ВЛАДИМИР НУХИМОВИЧ;

доктор физико-математических наук
КОБАНОВ НИКОЛАЙ ИЛЛАРИОНОВИЧ;

доктор физико-математических наук
ЯСНОВ ЛЕОНИД ВАСИЛЬЕВИЧ.

Ведущая организация: Специальная астрофизическая обсерватория РАН

Защита состоится « **24** » **июня 2011г.** в 11 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 при Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН (ГАО РАН) в Большом конференц-зале обсерватории по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д.65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН.

Автореферат разослан «_____»_____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук



Е.В. Милецкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованиям различных структур солнечной атмосферы с высоким пространственным и спектральным разрешением. Основой работ по исследованию колебательных процессов в солнечных пятнах, являются новые методы регистрации и цифровой обработки солнечного спектра, многолетние ряды наблюдений, полученные на пулковском солнечном телескопе с помощью быстродействующего видеоманитографа и цифровых камер. При исследовании долгопериодических колебаний пятен использованы длинные серии магнитограмм и доплерограмм солнечных пятен, полученные с космических аппаратов SOHO/MDI и SDO/HMI.

Основой работ по изучению морфологии и динамики тонкой структуры солнечной атмосферы являются новые эффективные средства и методы получения высокого пространственного разрешения. Для систематического исследования тонкой структуры фотосферы создан новый телескоп «открытого типа», с коротким ходом лучей большой апертуры, установленный на высоте 4330м на Восточном Памире. С его помощью автором получены высококачественные фотографии и спектры солнечных структур на протяжении цикла солнечной активности в 1977-1989гг. В работе также использован уникальный наблюдательный материал, полученный автором с коллегами на стратосферной солнечной обсерватории «Сатурн».

Актуальность

Несмотря на значительный прогресс в изучении Солнца, не существует полного понимания причин, порождающих те или иные солнечные структуры и их взаимосвязь. Процесс образования структур охватывает практически все слои атмосферы Солнца, проявляясь в разных объектах (пятна, поры, факелы, яркие точки тени пятна, темные гелиевые точки и т.д.) и происходит на масштабах от 10км (силовые магнитные трубки) до 10^6 км (протуберанцы, комплексы активности, корональные дыры). Поэтому выявление новых структур, изучение их морфологии, эволюции как в спокойных областях (СО), так и в активных областях (АО) солнечной атмосферы, является важной задачей для современной физики Солнца. Локализация структурных элементов, колебательные процессы в них, а также взаимосвязь их с магнитным полем крайне актуальная задача, поскольку колебательные процессы пронизывают все структурные элементы фотосферы, а магнитное поле непосредственно участвует в их образовании.

Исследование колебательных процессов в солнечных пятнах и в окружающей их фотосфере представляет особый интерес для солнечной физики, поскольку эти области заняты достаточно сильным (преимущественно вертикальным) магнитным полем. Волновые и колебательные свойства такой среды существенно отличаются от аналогичных свойств атмосферы, свободной от магнитного поля. До недавнего времени внимание исследователей было сосредоточено на изучении относительно короткопериодических (с периодами в 3-5 минут) МГД-колебаний в солнечных пятнах. Но наряду с этими, достаточно хорошо изученными осцилляциями, в солнечных пятнах и их окрестностях наблюдаются долгопериодические (с периодами от получаса до нескольких десятков часов) колебания физических параметров, которые, в частности, проявляются во временных вариациях магнитного поля и лучевых скоростей. Это явление не может быть выявлено при кратковременных (15-30 минут) сеансах наблюдений, здесь необходимо получить достаточно длительные и однородные временные ряды, характеризующие изменение параметров плазмы и магнитного поля исследуемых объектов. Анализируя спектр наблюдаемых колебаний и характер распространения в данной среде тех или иных типов волн, можно восстановить физическую структуру изучаемой системы и произвести диагностику ее параметров.

Солнце можно изучать с гораздо более высоким пространственным и спектральным разрешением, чем остальные звезды. Поэтому детальное исследование структур солнечной атмосферы имеет важный общий астрофизический интерес с точки зрения понимания природы активности звезд.

Актуальность исследованиям Солнца придает и то, что солнечная активность многогранно влияет на земные процессы, а также на окружающее космическое пространство. Современное высокотехнологическое общество все сильнее зависит от «космической погоды», которой управляет Солнце.

Цели

Основными целями диссертационной работы являются:

Всестороннее исследование малоизученного низкочастотного спектра колебаний солнечных пятен в широком диапазоне периодов, от нескольких минут до десятков часов. Также изучается с высоким пространственным и временным разрешением морфология и динамика структур солнечной атмосферы.

Цель достигается благодаря созданию и внедрению в практику наблюдений новых солнечных инструментов и методов получения астрономической информации. Используются результаты наблюдений стратосферной обсерватории «Сатурн», солнечного телескопа «Памир» (АНК-451), пулковского телескопа АЦУ-5 и данные космических аппаратов SOHO/MDI и SDO/HMI.

Основные положения, выносимые на защиту

I. Новые инструменты и методы получения информации о Солнце с высоким пространственным и временным разрешением:

- 1). Разработка и реализация концепции «открытого» мобильного солнечного телескопа «Памир», позволившего исследовать структуру фотосферы с более высоким, чем прежде, пространственным разрешением на протяжении целого цикла активности Солнца [*Solar physics*, 1985, v. 102, p.67-78].
- 2). Создание и внедрение в практику наблюдений нового типа спектрогелиографа-магнитографа [*Астрономический журнал*, 1996, т.73, №1, с.103-108; *Solar physics*, 2003, v.213, p.291], позволившего получить новые результаты по структурам в HeI $\lambda 10830$ и по быстрым изменениям магнитного поля пятен во время хромосферных вспышек.
- 3). Разработка и применение для исследования Солнца методики определения лучевых скоростей одновременно на нескольких уровнях атмосферы Солнца [*Астрономический журнал*, 2007, т. 84, №5, с. 450–460; *Оптический журнал*, 2008, т.75, №3, с.9-17]. С ее помощью доказано различие физической природы 3-5 минутных и низкочастотных колебаний пятен.

II. Новые научные результаты, полученные с помощью вышеназванных инструментов и методик, а также с использованием наблюдений стратосферной обсерватории «Сатурн» и космических аппаратов SOHO/MDI и SDO/HMI:

- 1). В спектре мощности яркости фотосферы выявлены компоненты, соответствующие размерам 10.0", 4.5", 2.4". Эти размеры хорошо укладываются в масштабы образований солнечной фотосферы: мезогранул, скоплений гранул (протогранул) и гранул, соответственно [*Solar physics*, 1997, v.170, p.205-215].

- 2). Впервые подтвержден на независимом материале предварительный вывод К.Харве (1985), что изменение числа темных гелиевых точек на диске Солнца происходит в противофазе с 11-летним циклом активности пятен [*Solar physics*, 1991, v.132, p.195-197].
- 3). По синхронным наблюдениям на телевизионном магнитографе ГАО, коронографе КрАО и памирском телескопе открыт новый тип фотосферных нитяных мостов, состоящих из ярких гранул. Мосты возникают в областях взаимодействующих пятен, совпадают с хромосферными дугowymi волокнами и ориентированы вдоль силовых линий магнитного поля. В периоды сильных вспышек в интервале нескольких минут в структуре продольного магнитного поля активной области могут происходить сильные изменения [*Solar physics*, 1985, v.102, p.67-78].
- 4). Доказано, что долгопериодические колебания пятен не являются эффектом земной атмосферы [*Астрономический журнал*, 2007, т. 84, №5, с. 450–460]. Это новое физическое явление, природа которого отличается от природы 3-5 минутных осцилляций в пятнах, которые обусловлены распространяющимися внутри силовой трубки пятна медленными магнитозвуковыми волнами. Долгопериодические - отражают вертикально-радиальные смещения пятна в целом, как устойчивого, уединенного образования, возникающие под действием внешних возмущений [*Космические исследования*, 2009, №4, с.311].
- 5). По наземным (в лучевых скоростях) и космическим снимкам (в магнитном поле) в колебательных спектрах пятен впервые выявлены моды в полосах 40-45, 60-80, 135-170, 220-250, 480-520 минут. Мощность колебаний в них быстро падает с ростом частоты, что характерно для обертонов, возникающих вследствие нелинейного характера колебаний [*Астрономический журнал*, 2007, т. 84, №5, с. 450–460; *Solar physics*, 2010, v. 267. Issue2. p.279].
- 6). Впервые установлено, что предельной низкочастотной модой колебаний магнитного поля солнечного пятна как целого является мода с периодом 13-22 час. (800 -1300 минут). Мода существует в виде цугов длительностью 1-2 суток (время жизни супергранулы). Ее период нелинейным образом зависит от величины магнитного поля пятна [*Космические исследования*, 2011, v.49, №3].
- 7). Обнаружена еще более низкочастотная колебательная мода с периодом 35-48 часов (2100-2880 минут), но она не может рассматриваться как предельная собственная мода пятна, поскольку ее период не зависит от величины магнитного поля, а амплитуда иногда оказывается ниже

амплитуды моды 13-22 часа. Вероятно, это квазипериод внешней возбуждающей силы, обусловленной динамическими возмущениями пятна со стороны окружающих его ячеек супергрануляции [*Космические исследования*, 2011, v.49, №3].

Научная новизна

- Впервые доказана высокая эффективность термостабилизированных «открытых» наземных телескопов большой апертуры с коротким ходом лучей, позволяющих благодаря высокому разрешению исследовать солнечные структуры на качественно новом уровне.
- Телевизионный магнитограф выявил быструю перестройку конфигурации продольного магнитного поля активной области во время протонных вспышек. Наблюдения одновременно на нескольких уровнях атмосферы Солнца показали, что физическая природа 3-5 минутных и долгопериодических колебаний пятен различна.
- По наземным и космическим наблюдениям получено доказательство существования нового физического явления - низкочастотных собственных колебаний солнечных пятен. Впервые найден весь спектр низкочастотных колебаний пятна как целого. Открыта предельная собственная низкочастотная мода колебаний, существующая в полосе 13-22 часа. Ее период существенно и нелинейно зависит от напряженности магнитного поля в пятне.
- Телевизионные спектрогелиограммы в ИК линии HeI $\lambda 10830\text{A}$ позволили выявить и изучить новые свойства темных гелиевых точек, например, изменение их количества на диске Солнца в противофазе с ходом 11-летнего цикла солнечных пятен.

Практическое значение

- Обнаруженные низкочастотные собственные колебания магнитных элементов солнечной фотосферы открывают новые возможности для диагностики физических и геометрических параметров активных образований на Солнце, например, для определения нижней магнитной границы пятна.
- Телевизионный спектрогелиограф - магнитограф позволяет по наземным наблюдениям в линии HeI $\lambda 10830$ изучать в нижней хромосфере проявления корональных структур (границы корональные дыры). Можно проводить наблюдения колебательных процессов продольной

составляющей магнитного поля, лучевых скоростей и яркостей пятен одновременно в нескольких спектральных линиях.

- Впервые разработанный и примененный удаленный доступ на основе WEB-технологии к солнечному телескопу, позволяет любому пользователю Интернета получать на стандартный компьютер цифровое изображение Солнца в момент связи с телескопом, с возможностью активного управления параметрами изображения в реальном масштабе времени.

Апробация

Основные результаты диссертационной работы докладывались на ряде международных и всероссийских научных конференций, на симпозиумах МАС по физике Солнца, на семинарах рабочей группы «Солнечные инструменты» Астросовета АН. Среди них:

- Семинар рабочей группы «Солнечные инструменты» Астросовета АН, Иркутск, 1982
- Всесоюзная конференция «Физика Солнца», Алма-Ата, 1987
- Семинар рабочей группы «Солнечные инструменты» Астросовета АН, Ашхабад, 1988
- Международная конференция «Новый цикл активности Солнца»: наблюдательные и теоретические аспекты, С.Петербург, Пулково, 23-29.06.1998
- Конференция «Крупномасштабная структура солнечной активности», Пулково, 21-25 июня 1999
- Международная конференция «Солнце в максимуме активности и солнечно-звездные аналоги», Пулково, С.Петербург, 17-22 сентября, 2000
- Международная конференция «Солнце в эпоху смены знака магнитного поля», 28.05-1.06.2001, С.Петербург, Пулково
- Joint European and National Meeting JENAM 2001 of the European Astronomical Society at Munich, September 10-15, 2001
- Международная конференция «Расширение и связь опорных координатных систем с использованием ПЗС наземной техники», 10-13.10.2001, Николаев, Украина
- Международная конференция «Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля», 17-22.06. 2002г. Пулково
- Международная конференция «Климатические и экологические аспекты солнечной активности», 7-11.07.2003, Санкт-Петербург, ГАО РАН

- Международный научный семинар «Физика Солнца и звезд», Калмыцкий госуниверситет, Элиста, март 2005
- IX Пулковская Международная научная конференция «Солнечная активность как фактор Космической Погоды», Санкт-Петербург, 4 по 9 июля 2005
- X Пулковская Международная научная конференция «Квазипериодические процессы на Солнце и их геоэффективное проявление», Санкт-Петербург, июль 2006
- Всероссийской конференции «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности », 28 сентября - 2 октября 2006г, САО РАН, п. Нижний Архыз.
- XI Пулковская Международная научная конференция «Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геоэффективных проявлений», Санкт-Петербург, 2 по 7 июля 2007
- XII Пулковская Международная научная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика», Санкт-Петербург, 7 по 12 июля 2008
- First Middle East-Africa, Regional IAU Meeting, Cairo, Egypt, April 5-10, 2008
- Всероссийская международная конференция по физике Солнца « Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика» Санкт Петербург, 2009
- Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика», Санкт-Петербург, 2010
- American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract #SH23C-1877

Симпозиумы МАС:

- IAU Symposium №138 «Solar photosphere: structure convection and magnetic fields», Kiev, USSR, may 15- 20, 1989
- IAU Symposium № 223 «Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity», St. Petersburg, Russia, June 14-19, 2004

Различные аспекты работы, положенные в основу диссертации, прошли экспертизу и выполнялись по программам фундаментальных исследований отдела физики Солнца ГАО РАН. Они были поддержаны грантами Российского Фонда Фундаментальных Исследований: 02-07-90068, 02-07-90254, 06-02-03025-б, 07-02-05006-б, 08-02-05008-б, 10-02-05002-б, а также Государственной научно-технической программой «Астрономия», программой №30 Президиума РАН «Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля» (2005-2009), Американским астрономическим обществом (1994г.), грантом Научной программы СПб НЦ РАН 2008г., программой РАН П-19.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, двух частей, состоящих из пяти глав, заключения и списка литературы из 301 наименования. Общий объем диссертации 318 страниц, в том числе 137 рисунков и 28 таблиц.

Публикации

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 74 работах, из которых 50 (по NASA ADS) в реферируемых журналах, в том числе 11 в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторской диссертации. Остальные публикации - это труды симпозиумов МАС(2), труды международных и всероссийских астрономических конференций(20), труды ЛГУ(1), сборники «Известия ГАО РАН»(9) и бюлл. «Солнечные данные»(27), монографии(2).

Личный вклад автора

Исследования, представленные в диссертации, выполнены автором как самостоятельно, так и в сотрудничестве с коллегами из отдела физики Солнца ГАО РАН (в основном), КрАО, СпбГУАП. Работа по созданию памирского солнечного телескопа выполнялась при участии большого коллектива технических специалистов, главным образом КОМЗа (ЦКБ «Фотон»). В работах по созданию нового оборудования большую пользу автору оказало КБ и Опытное Производство ГАО РАН.

26 работ выполнены без соавторов. В остальных работах автору принадлежит аппаратурная часть и получение наблюдательного материала. В обработке и анализе результатов автору принадлежит равный вклад наряду с соавторами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы, определены основные цели и задачи диссертации, сформулированы основные положения, вынесенные на защиту, кратко описано содержание работы.

В первой части диссертации рассматриваются инструменты и методы, разработанные и примененные для изучения структур солнечной атмосферы.

Глава 1. Светоинформационные астрономические системы, использованные для исследования Солнца.

В **п.1.1.** рассматриваются вопросы оптимального построения астрономической информационной системы, основными звеньями которой являются: сам объект исследования, т.е. Солнце, земная атмосфера (дневной

астроклимат обсерватории), комплекс телескоп-павильон, спектрограф, светоприемник (телевизионная трубка или матрица), устройство обработки и регистрации информации. Показано, что с появлением цифровых методов регистрации изображения самым «узким» местом становятся первые звенья светоинформационной системы – астроклимат и телескоп.

В п. 1.2. рассматриваются телескопы, с помощью которых выполнялись исследования. Во введении рассматриваются три основных способа применяемые при исследовании атмосферы Солнца. Затем кратко описывается Памирский мобильный солнечный телескоп открытого типа на

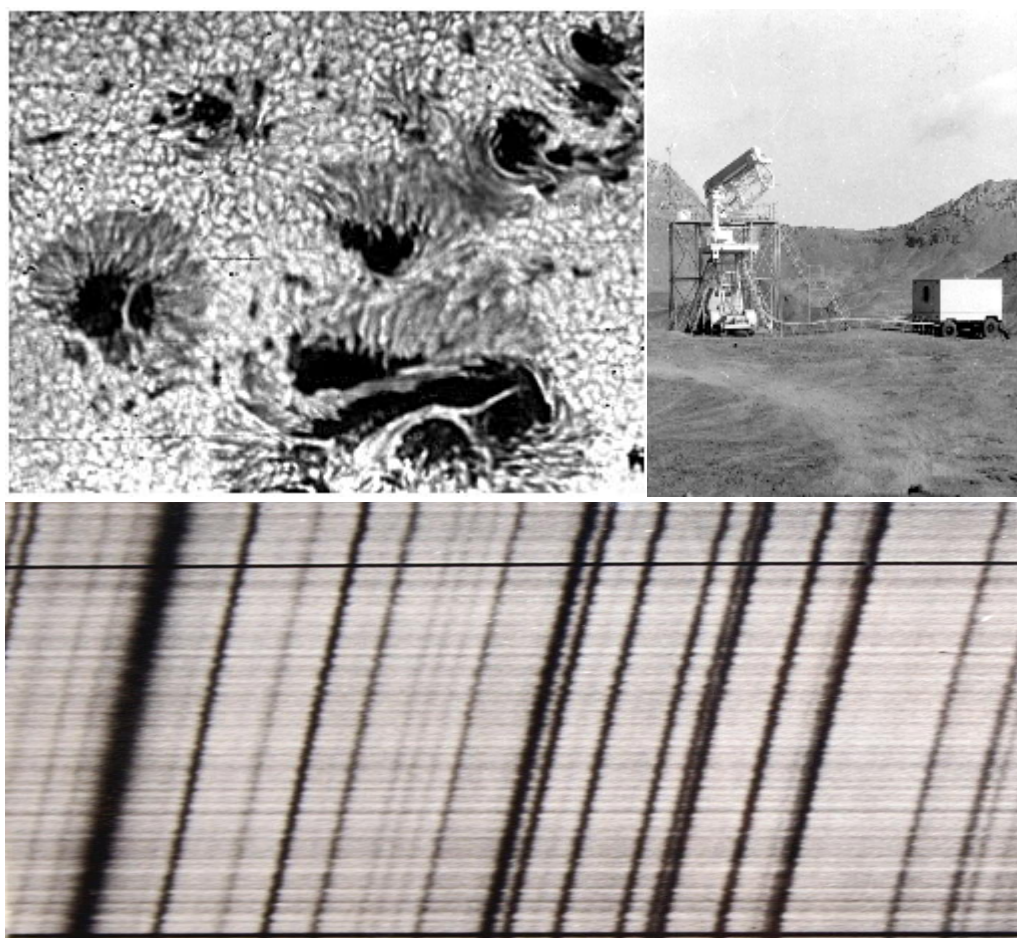


Рис.1. Телескоп «Памир» в рабочем положении. Приведены фрагменты снимка активной области и спектрограммы. В течение сезонов 1977 -1989гг на телескопе получен очень большой фотографический и спектральный материал по тонкой структуре солнечной фотосферы.

альтазимутальной монтировке. Автор был научным руководителем работ по разработке концепции и созданию этого телескопа (изготовитель - Казанский оптико-механический завод), предназначенного для систематического изучения тонкой структуры атмосферы Солнца спектральными и

фотографическими методами. Кратко описаны астроклиматические исследования, проведенные автором на Памире в 1975г при выборе места для установки телескопа. Показано, что причина высокого качества наблюдательного материала, полученного на протяжении 1977-1989гг, заключена главным образом в оптимальной конструкции телескопа. Это короткие оптические пути, проходящие высоко над грунтом, открытая продуваемая ветром термостатированная (инварная) рама телескопа, высоко установленного над землей на подъемной платформе, это эффективные электронные анализатор качества и автоматическая фокусировка, это удаление на 15м от телескопа источников тепловых помех - электронной аппаратуры и самого наблюдателя в отдельно стоящий вагон-операторскую. Затем коротко рассмотрен наземный вариант солнечного 100-см телескопа-рефлектора «Сатурн 1», выполненный на базе телескопа стратосферной обсерватории и разработанный для него малогабаритный высокодисперсионный солнечный спектрограф со скрещенной дисперсией. Последним рассмотрен пулковский солнечный телескоп АЦУ-5, спектрограф которого состыкован с разработанным автором телевизионным спектрогелиографом-магнитографом. На телескопе с помощью цифровых приемников выполняются исследования колебательных процессов в пятнах. В п. 1.3. во введении коротко рассмотрена история применения телевизионных методов получения изображений в астрономии. Затем описываются примененные в работе светоприемники - вакуумные телевизионные передающие трубки суперортикон и изокон, их эффективность сравнительно с астропhotoэмульсиями. Рассмотрены основные преимущества ПЗС приемников и цифровых CMOS камер.

В главе 2. в п.2.1 и 2.2. рассматривается разработанный автором прибор - телевизионный спектрогелиограф-магнитограф, вначале его аналоговый вариант на суперортиконе, а затем цифровой вариант на CCD видеокамере. Благодаря примененному методу двух электронных «щелей» и преобразованию стандартного телевизионного сигнала от видеокамеры с частотой строк 15625гц в малокадровый сигнал с частотой строк 50гц, удалось просто и эффективно решить сложную на то время проблему вычитания двух спектрогелиограмм, получаемых строго одновременно с одним светоприемником (электронный, без механической развертки изображения, вариант метода Лейтона). Видеокарта области на Солнце размером (240"×260") получается за 18 сек. Для сравнения видеоманитограф Китт-Пик (США) - 30 сек, панорамный магнитограф СибИзма - 300 сек, вектор-магнитограф - 30-50 минут. Телевизионный

спектрогелиограф-магнитограф универсальный прибор, позволяющий получать, например, полутонные магнитограммы, спектрогелиограммы и доплерограммы активных образований в атмосфере Солнца в любой длине волны видимого и ближнего ИК спектра. Для видеоманитографа разработано специализированное программное обеспечение, что позволяет всесторонне исследовать колебательные процессы в атмосфере Солнца.

В главе 3. рассматриваются новые методы организации процесса астрономических наблюдений

В настоящее время все большее значение приобретает автоматизация процесса получения астрономической информации. Появились наземные робот телескопы. Имеются телескопы с удаленным доступом. Нами также проведена работа в этом направлении. Памирский солнечный телескоп является по существу прообразом робот телескопа. В нем предусмотрен аналоговый программатор, с помощью которого телескоп без участия астронома может получать спектры и фотографии Солнца по команде электронного анализатора качества весь световой день.

В п.3.1. изложены результаты работы по созданию удаленного доступа к солнечному телескопу на основе Интернет-технологий (грант РФФИ 02-07-90068). Главная идея Web-технологий – применение гипертекстовой модели к информационным ресурсам, распределённым в сети. Технология World Wide Web построена по схеме "клиент-сервер". Программа-клиент выполняет функции интерфейса пользователя и обеспечивает доступ практически ко всем информационным ресурсам Internet. Ресурс – это не только пассивная документация. Ресурсом может быть и активное приложение, за которым может стоять, например, телескоп. Преимущества Web-технологий для построения системы, обеспечивающей удалённый доступ к какому-либо оборудованию, заключаются, прежде всего, во всемирной распространённости Web, в возможности ее применения любыми пользователями сети Интернет.

В п.3.2. кратко рассмотрены некоторые работы по созданию универсального малогабаритного робот-телескопа с быстрыми приводами для изучения вспышечных процессов с помощью многоканального голограммного спектрофотометра (грант РФФИ 02-07-90254).

Во второй части диссертации излагаются результаты исследования солнечных структур.

Глава 4 посвящена изучению морфологии и динамики тонкой структуры солнечной фотосферы

В п. 4.1. речь идет об организации тонкой структуры солнечной фотосферы.

Для исследования фотосферных структур от гранульного до супергранульного масштабов было обработано несколько лучших снимков фотосферы Солнца, полученных во время 3-го полета стратосферной обсерватории «Сатурн» 30 июля 1970г с высоты 20км. На этих снимках практически отсутствует влияние земной атмосферы на качество изображения и достигнуто теоретическое разрешение телескопа с диаметром параболического зеркала 50 см - 0".25. Для оценки вероятности неслучайности присутствия того или иного структурного элемента был использован критерий Фишера - превышение пиками СМ некоторого доверительного уровня, построенного над средней мощностью процесса. В спектре мощности четко выделяются три пика, соответствующие значениям 10".0, 4".5 и 2".4 (рис.2). Размеры их хорошо укладываются в пределы размеров известных образований в солнечной фотосфере: мезогранулы, скопления гранул и гранулы соответственно. Наиболее устойчивым минимальным масштабом является гранульная сетка 1".5 - 2".4. Высоты более высокочастотных пиков существенно ниже $2s$ и соответствующие им образования в значительной степени носят случайных характер. Принято считать, что между гранулой и супергранулой существует промежуточный масштаб, определяемый как мезогранула. Однако мы получили, что наряду с масштабом образований с размерами 10" - 15", достаточно уверенно выделяется масштаб образований 3"- 5" как при статистическом анализе, так и при рассмотрении изофот. Этот масштаб соответствует скоплению

Таблица 1. Структурные образования фотосферы

N	масштаб «спокойного Солнца»	размеры (дуговые секунды)	средний размер (км)	время жизни
1	гранула	1".5-2".4	1300	5 ^m - 16 ^m
2	протогранула (скопление гранул)	3"-5".5	3000	5 ^m - 45 ^m
3	мезогранула	8"-15"	9000	> 2 ^h
4	супергранула	35"-45"	29000	24 ^h

гранул эволюционирующих путем фрагментации и имеющих тенденцию расширяться, так называемые «взрывающиеся гранулы». Это свойство делает протогранулы похожими на мезогранулы и супергранулы, которые, как известно, также показывают расходящиеся горизонтальные движения гранул

от центра образования к периферии. Можно выделить четыре масштаба структурных образований солнечной фотосферы (см. таблицу 1). Приведенные в таблице масштабы особенно наглядно проявляются в возбужденных областях фотосферы. В этом случае магнитное поле подчеркивает структуру различных образований за счет увеличения концентрации на их границах.

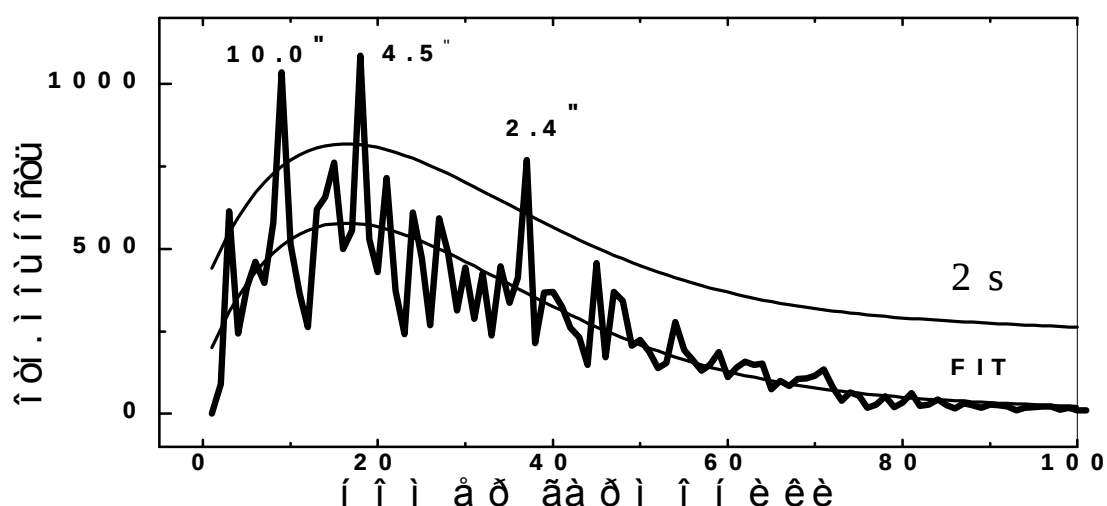


Рис.2. Выделяются компоненты соответствующие масштабам 10.0", 4.5", 2.4" (мезогранула, скопление гранул и грануляция)

В п. 4.2. приведены результаты исследования темных гелиевых точек по ИК линии HeI $\lambda 10830\text{\AA}$.

В ярких рентгеновских точках (ЯРТ), где особенно велика коротковолновая эмиссия, излучение в линии HeI $\lambda 10830\text{\AA}$ ослаблено и поэтому ЯРТ выглядят в гелии на диске Солнца как темные точки, которые так и называются - темные гелиевые точки (HeI dark points). Более внимательное рассмотрение показывает, что название темные гелиевые точки условно, поскольку они имеют часто неправильную форму и тонкую внутреннюю структуру. Из гистограмм видно, что размеры темных гелиевых точек заключены в пределах 3-30", при этом максимум их приходится на 6-12". Детали размером менее 3" нами не рассматривались, хотя они многочисленны и наряду с большими слабыми деталями образуют хромосферную гелиевую сетку. По существу весь диск Солнца покрыт сплошной гелиевой сеткой со средним размером ячеек около 40". На изображениях Солнца, полученных в мае 1986г, можно насчитать около 250 крупных гелиевых точек. Всего видно порядка 1100 темных гелиевых образований размером 3-30". В гелиевой хромосфере, видимой на краю солнечного диска в излучении, высота которой

по снимкам в HeI $\lambda 10830\text{\AA}$ составляет около 2600 км, также заметны структурные элементы колонкообразного вида с шириной 1.7-3.5" и высотой 3.5-4". Эти образования, как и элементы гелиевой сетки, можно, по видимому, отождествить со спикулами, так и со скоплениями их в узелках сетки. В целом можно сказать, что почти во всех темных гелиевых точках наблюдается преимущественное движение вниз со скоростью в несколько км/сек.

Сравнение с другими обсерваториями показывает, что наш метод использования для получения спектрогелиограмм черно-белых видеокамер с небольшими CCD матрицами для большинства задач вполне конкурентоспособен и обладает большой универсальностью. Кроме высококачественного изображения наш прибор дает для каждой точки изображения фотометрический профиль исследуемой линии.

Важным фактом является то, что количество темных гелиевых точек на диске Солнца меняется с циклом солнечной активности и это изменение происходит в противофазе с изменением чисел Вольфа. Впервые об этом сообщила К.Харви для интервала времени 1976-1984 гг. Наши независимые наблюдения темных гелиевых точек в 1986-89 гг подтвердили этот факт и позволили изучить их тонкую структуру.

В п. 4.3. представлены исследования сложных групп пятен, связь вспышечной активности с быстрыми изменениями продольных магнитных полей, а также изучены светлые мосты в пятнах.

Была изучена вспышечная активность большой группы пятен, прошедшая центральный меридиан 15 июля 1982 г на широте 15° . Материалом послужили Na фильмы, полученные на коронографе Крымской астрофизической обсерватории, и снимки фотосферы, полученные на астрономическом комплексе «Памир». Для анализа предвспышечной ситуации использовались серии карт продольных магнитных полей, полученные на пулковском видеоманитографе с 12 по 18 июля.

Изучение магнитограмм выявило, что в тонкой структуре магнитного поля наблюдались быстрые изменения. Новым фактом является уточнение интервала времени (несколько минут), в течение которого могут происходить резкие изменения продольного магнитного поля при сильных вспышках. Анализ материалов наблюдений позволил сделать следующие выводы:

1. Протонные вспышки 12 июля могут быть следствием взаимодействия трех различных ветвей активной области. По некоторым признакам они сопутствовали процессу объединения двух из этих ветвей. Район взаимодействия был наиболее вспышечно активен.

2. Ленты протонных вспышек, как и волокна, яркие флоккульные цепочки, располагались над светлыми коридорами из ярких точек внутри тени и полутени пятен.
3. Ведущая N-полярность в рассматриваемой группе отличалась более тонкой структурой, чем S-полярность и большей устойчивостью.
4. В периоды сильных вспышек в интервале нескольких минут происходят заметные изменения структуры продольного магнитного поля.

Проведен анализ вспышечной ситуации в гр.286 6 июня 1980г. Было получено 52 карты продольного магнитного поля, равномерно распределенные между $9^{\text{h}}42^{\text{m}}$ и $16^{\text{h}}04^{\text{m}}$ местного времени. Показано, что резкое всплытие сателлитной северной полярности около лидера не привело, как можно было бы ожидать, к увеличению вспышечной активности. Сильное изменение в противофазе южной и северной полярности также происходит не в момент увеличения числа вспышек, опережая его на два с лишним часа. На момент максимума вспышечной активности приходится одновременное уменьшение площадей северной и южной полярностей.

В результате анализа морфологии и динамики сложных групп пятен получено, что:

1. Грануляционные мосты в фотосфере образуются в пятнах, расположенных в области нестационарного магнитного поля.
2. Обнаружен новый тип пекулярных фотосферных нитевидных мостов, эти мосты являются цепочками ярких гранул, расположенных и распространяющихся к пятнам.
3. Нитевидные мосты образуются в областях развития и соединения пятен и их ориентация перпендикулярна нейтральной линии.
4. Положение и ориентация грануляционных и нитевидных фотосферных мостов совпадает с положением и ориентацией хромосферных арочных волокон и фибрильных струй тонкой хромосферной структуры, т.е. эти мосты направлены вдоль силовых линий магнитного поля.

Глава 5 посвящена изучению колебательных процессов в пятнах и окружающей фотосфере.

Всего при исследовании колебательных процессов в пятнах обработано 215 разных серий наблюдений, из них: 161 серия наземных наблюдений на телескопе АЦУ-5 (длительность от 30 мин. до 10ч.) и 55 серий космических наблюдений SOHO/MDI и SDO/HMI (длительность серий до 360ч.).

В п.5.1. речь идет о короткопериодических колебаниях.

Сохраняя историческую последовательность, рассматриваются работы, выполненные еще в 90-е годы с помощью аналогового видеоманитографа на телевизионной трубке изокон до современных исследований, проводимых с помощью цифровой техники.

В п.5.1.1. рассмотрены первые положительные результаты исследования короткопериодических колебаний в пятнах, которые были получены на аналоговом видеоманитографе в 1994г. Из проведенного анализа наблюдений колебаний магнитного поля в пятнах можно сделать следующие выводы:

Выделение слабого сигнала флуктуации магнитного поля в тени солнечного пятна осложняется его сильной зашумленностью – прежде всего атмосферным дрожанием пятна на щели спектрографа.

Применение разработанных нами методов обработки наблюдений, в том числе и коррекция атмосферного дрожания, позволило выделить в некоторых пятнах 3-х и 5-ти минутные периоды колебаний м.п. Колебания с периодом 3 –х минут носят характер возбужденных цугов в небольших площадках тени пятна.

В п.5.1.2. рассматриваются колебания магнитного поля в солнечных пятнах по пяти группам солнечных пятен в июне-июле 1999г. Установлено, что при таких исследованиях особенно существенен учет атмосферного дрожания.

В п. 5.1.3. продолжено рассмотрение колебания лучевых скоростей и магнитного поля в тени солнечных пятен по наблюдениям 1998-2002гг., повышая достоверность результата с помощью разных методов освобождения сигнала от паразитных эффектов. Лучевые скорости определялись одновременно по трем спектральным линиям, образующихся на разных высотах фотосферы Солнца FeI $\lambda 6496.47\text{A}$, FeI $\lambda 6494.99\text{A}$, Ba⁺ $\lambda 6496.91\text{A}$. Показано, что низкочастотные колебания покрывают большую часть пятна, и что в тени и полутени амплитуды колебаний резко падают с высотой. Уже на высоте образования линии FeI $\lambda 6494.99\text{A}$ (604 км) колебания в тени пятна отсутствуют.

В п.5.1.4. речь идет об исследовании колебаний лучевых скоростей в активных областях Солнца, выполненных с помощью цифровых камер. Их применение позволило получить длинные однородные серии спектрограмм существенно лучшего качества по сравнению с изображениями спектра, получаемыми на видеоманитографе. Достаточно сказать, что, если размер CCD матрицы видеокамеры 5×7мм, то CMOS датчик цифровой камеры уже 24×36мм.

На основе проведенного исследования особенностей поведения лучевых скоростей на различных высотах можно сделать следующие выводы. В слабо

возбужденной, как и в спокойной фотосфере в основном наблюдаются 5-минутные колебания лучевых скоростей. Пространственно они проявляются в виде всплесков максимумов мощности с расстояниями между крайними из них $\sim 38''$, т.е. размера супергранулы. Область локализации колебаний составляет при этом $\sim 6-9''$. По мере приближения к пятну, область локализации «размывается» - становится бимодальной и мощность колебаний в них падает. Эта особенность характерна для сильно возбужденной области (вблизи пятна), причем, на низких высотах фотосферы проявляется более отчетливо. Вблизи границы с полутенью пятна характер колебательного процесса резко меняется: возбуждаются и усиливаются низкочастотные моды колебаний, особенно выделяются моды с периодами 7 и 13-минут.

Таким образом, усиление напряженности магнитного поля в фотосфере существенным образом изменяет характер колебаний лучевых скоростей не только в солнечных пятнах, но и в их окружении.

В п. 5.2. рассмотрены долгопериодические колебания

П. 5.2.1. посвящен исследованию долгопериодических колебаний лучевых скоростей в пятне и вблизи солнечного пятна на разных уровнях фотосферы.

Представлены результаты исследований, проведенных с целью проверки теоретических предсказаний модели мелкого солнечного пятна. Наблюдения проводились в мае 2006 года на телескопе АЦУ-5 ГАО РАН в Пулковке. Исследовались колебательные процессы в солнечном пятне и его ближайших окрестностях на основе спектрограмм хорошего качества. Благодаря достаточно продолжительным сеансам наблюдений, достигавшим 4 часов при регистрации со скважностью 15-30 секунд, удалось достоверно выявить низкочастотную область колебаний магнитных элементов с периодами от 40 до 80 минут. Низкочастотная мода в смысле пространственного распределения реализуется на масштабах мезогрануляции ($10''-12''$). Получено, что амплитуда низкочастотной моды в солнечном пятне быстро убывает с высотой: будучи отчетливо выраженной, на уровне 200 км, она становится едва заметной на высоте 500 км. (см. рис.3). Колебания низкочастотной моды устойчиво прослеживаются в течение всего сеанса наблюдений (до 4 часов). Полученные результаты подтверждают выводы модели мелкого пятна, описывающей собственные колебания магнитного элемента как целого (вертикально-радиальные колебания) около некоторого положения устойчивого равновесия.

В п.5.2.2. рассмотрены особенности проявления долгопериодических и короткопериодических колебаний солнечных пятен в оптическом и радиодиапазонах.

В данном параграфе проведен сравнительный анализ долгопериодических колебаний в активной области №10875 по наблюдениям 2 мая 2006г. в оптике (ГАО РАН) и в радиодиапазоне (радиогелиограф Набияма) на волне 1.76 см. Полученные вейвлет-спектры показывают наличие практически одного и того же периода колебаний в пределах 80-100 мин, как в оптических, так и в радио данных. По обоим данным регистрируется затухание амплитуды колебаний около 7 часов UT, вблизи промежутка между наблюдениями. Результаты данной работы указывают на целесообразность продолжения кооперативных исследований колебательных процессов в разных диапазонах спектра.

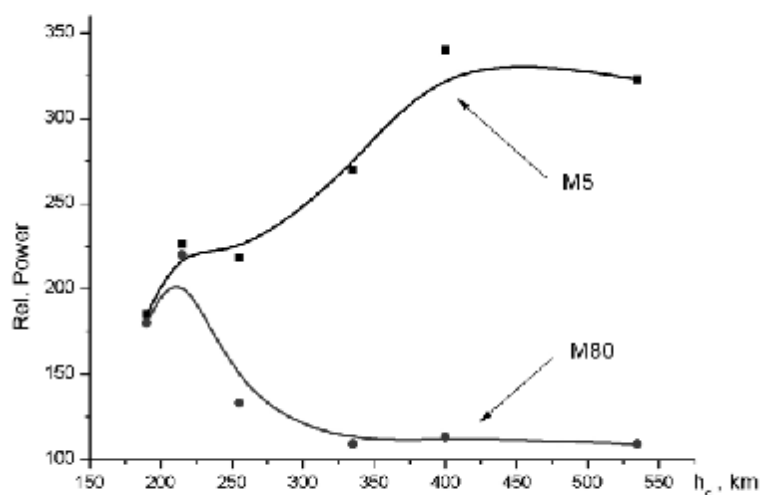


Рис.3. Зависимость спектральной мощности колебаний в пятне от высоты в полосах частот (3.8-4.2) MHz и (0.1-0.7)MHz, соответственно для 5-ти минутной и 80-ти минутной моды.

В п. 5.2.3. рассмотрены особенности высотного распределения мощности коротко- и долгопериодических колебаний в пятне и в окружающих магнитных элементах. Настоящий раздел посвящен детальному исследованию одного из принципиальных различий между высокочастотными и низкочастотными колебаниями солнечных пятен на основе исследования в спектрах пятна доплеровских смещений линий, образующихся на разных высотах атмосферы. Были обработаны длительные (4 часа) и однородные ряды цифровых спектрограмм участка солнечного спектра в диапазоне $\lambda 6493.8\text{A} - \lambda 6499.7\text{A}$. Эта область целиком помещается

на матрице размером $22,2 \times 14,8$ мм, примененной нами в то время цифровой камеры, и содержит семь солнечных спектральных линии, образующихся на высотах от 190 км до 535 км, и одну теллурическую линию, используемую для контроля. В солнечном пятне, мощность колебаний резко падает с высотой, и основная гармоника имеет обертоны: $f_1 = 0,2$ МГц, $f_2 = 0,6$ МГц и $f_3 = 0,9-1,5$ МГц (периоды 83, 28 и 20-12 минут, соответственно). Это явление прослеживается для всех дат наблюдений. Особый интерес представляет сопоставление высотной зависимости мощности долгопериодических колебаний в пятне и в около пятенных областях, точнее, в «островах» возбуждения, в магнитных элементах, окружающих пятно. В отличие от пятна, в около пятенном пространстве амплитуда колебаний низкочастотной 60-80-мин. моды уменьшается с высотой значительно медленнее, чем в пятне, где она падает в 3-4 раза уже к высотам ~ 250 км. Это, на наш взгляд, важный физический эффект, свидетельствующий о том, что в количественном отношении свойства солнечных пятен и магнитных элементов (в частности, вертикальный градиент магнитного поля) могут отличаться. Физическая природа долгопериодических колебаний состоит в том, что солнечное пятно, как целостный объект, находясь в состоянии устойчивого равновесия, способно под воздействием внешних возмущений (вероятно, шума супергрануляции) испытывать колебания около данного равновесного положения.

П. 5.2.4. посвящен методу прямого измерения доплеровских смещений и эффекта Зеемана по цифровым спектрограммам Солнца. В данном разделе более подробно описан разработанный в ГАО РАН метод прямого измерения доплеровских смещений и зеемановского расщепления спектральных линий по цифровым спектрограммам солнечного пятна и прилегающих к нему слоев фотосферы. Показано, что при обработке полученных этим методом достаточно длительных (до 4-х часов) рядов наблюдений удастся надежно установить, что в солнечном пятне и в окружающих его магнитных элементах наблюдаются не только широко известные 3-5 минутные колебания, но и низкочастотная составляющая часть колебательного спектра, с периодами от 40 до 80 минут, которая до недавнего времени оставалась практически неисследованной.

В случае колебаний с периодами порядка часа и более мы имеем дело с квазипериодическими вертикальными смещениями всего пятна или магнитного элемента, как целого. Указанные смещения плазмы пятна носят колебательный характер, поскольку солнечное пятно в целом является устойчивым долгоживущим образованием. Смещения сохраняют общую структуру пятна и затрагивают его глубокие слои, вплоть до нижней

магнитной границы 4-5 тысяч км., и продолжаясь вглубь до 10 тыс. км. Благодаря этому, в колебательный процесс вовлекаются значительные массы плазмы, и периоды колебаний оказываются достаточно большими.

Примененная методика прямой регистрации доплеровских смещений и зеемановских уширений, выполняемой одновременно для всех линий, попадающих на матрицу, дает возможность исследовать изменения характеристик колебательных процессов в солнечной атмосфере в зависимости от высоты образования спектральных линий.

В п.5.2.5. излагаются результаты исследования долгопериодических колебаний солнечных пятен, выполненного по наземным наблюдениям и по данным космических аппаратов SOHO/MDI и SDO/HMI.

Первоначально, в 2006-2007 гг., для исследования низкочастотных колебаний пятен нами использовались длинные, до 8-ми часов, серии цифровых спектрограмм пятен, полученные на солнечном телескопе Пулковской обсерватории. Примененная методика автоматического измерения временных вариаций лучевых скоростей по доплеровским смещениям линий в спектрах солнечных пятен и пор позволила нам с высокой степенью надежности установить сам факт наличия долгопериодических (с периодами в полосах 40-45, 60-80 и 160-180 минут), колебаний пятен и околотпятенных магнитных элементов. Оказалось, что солнечное пятно, как единое целое, совершает квазипериодические вертикальные смещения: оно то поднимается, то опускается, при этом, очевидно, вследствие относительной медленности процесса, сохраняется баланс давлений между пятном и окружающей фотосферой, так что при вертикальных смещениях пятна изменяется и поперечный размер его магнитной силовой трубки, а вместе с этим и среднее по сечению магнитное поле. Амплитуда колебаний в низкочастотной моде магнитного поля порядка 200-250 Гс, а лучевой скорости - порядка 60-110 м/сек. Частота колебаний существенно и нелинейным образом зависит от напряженности магнитного поля. Важнейшее достоинство используемого метода состоит в том, что картина колебаний получается строго одновременно в нескольких спектральных линиях, образующихся на разных высотах в атмосфере пятна. Это позволило изучить высотные зависимости колебательного процесса как для относительно высокочастотной части спектра (3-5 минутные колебания), так и для низкочастотных колебаний, в которых пятно колеблется как единое целое с периодами от 40 минут до десятков часов. Оказалось, что низкочастотные колебания захватывают большую часть тени пятна, и их амплитуда резко уменьшается с высотой. Так, будучи отчетливо выражены на глубинах образования линии Fe $\lambda 6496.47\text{A}$ (это соответствует высоте 250

км от уровня единичной оптической толщины), уже на высоте 604 км, где образуется линия Fe $\lambda 6494.99\text{\AA}$, колебания в тени пятна становятся недоступны для регистрации. Для контроля возможного влияния атмосферы на спектр исследуемых колебаний нами используется теллурическая линия H_2O $\lambda 6493.25\text{\AA}$. Полное отсутствие низкочастотных колебаний в теллурической линии спектров пятен однозначно указывает на солнечную природу эффекта.

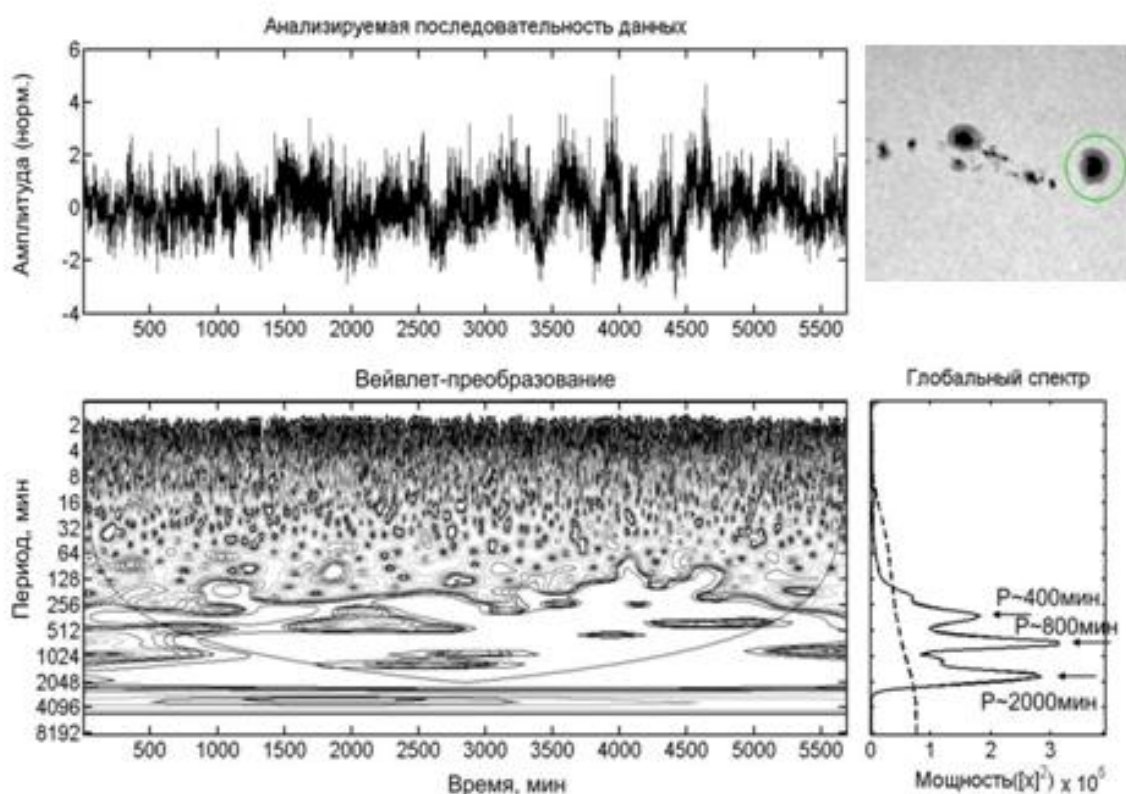


Рис.4. Пример типичного вейвлета для серии магнитограмм SOHO/MDI, полученных с интервалом одна минута, на котором видны низкочастотные собственные моды колебаний магнитного поля пятна и мода в районе 2000 мин.

Более того, наши исследования показали, что низкочастотные колебания лучевых скоростей полностью отсутствуют и в спокойной фотосфере, свободной от магнитных элементов. Этот фундаментальный факт устанавливает прямую связь исследуемых осцилляций с магнитными структурами.

С 2008 года мы перешли к исследованию временных вариаций магнитного поля в тени отдельных солнечных пятен, используя данные из архива SOHO/MDI (Scherrer et al., 1995), а в настоящее время также архива космического аппарата SDO/HMI.

Для целей этого исследования разработаны оригинальные компьютерные методики, позволяющие автоматизировать процесс обработки и анализа космических данных.

Оказалось, что низкочастотные моды, ранее обнаруженные нами в наземных наблюдениях по лучевым скоростям, отчетливо проявляются и в космических магнитограммах. Этим была еще раз подтверждена физическая реальность и солнечное происхождение исследуемых долгопериодических колебаний пятен на независимом материале, полученном вне земной атмосферы, и решен вопрос о возможном влиянии атмосферных эффектов на спектр изучаемых осцилляций.

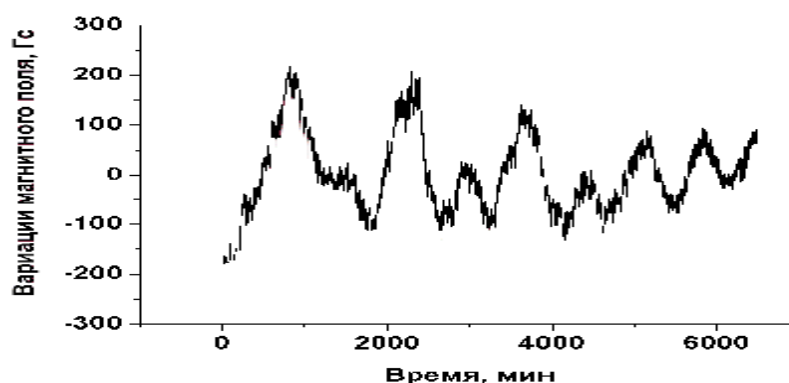


Рис.5. Вариации магнитного поля пятна NOAA 11101(SDO/HMI)

Длительные непрерывные серии FITS магнитограмм, полученные космическими аппаратами SOHO/MDI и SDO/HMI, позволили нам приступить к исследованию еще более низкочастотных мод, недоступных при наземных наблюдениях (рис.4). Применяемая нами методика обработки магнитограмм, позволяет автоматически определять положение максимальной напряженности магнитного поля в исследуемом пятне с учетом вращения Солнца и собственного движения пятна для всей серии наблюдений. На рис.5 приведен конкретный пример сформированного 108 часового ряда максимальных значений магнитного поля для серии магнитограмм солнечного пятна NOAA 11101, полученных на аппарате HMI(SDO) 28.08.2010 – 01.09.2010. Видно, что амплитуда вариации магнитного поля, составляющая примерно 150-200 Гс, значительно превышает уровень шума, для которого среднее квадратичное отклонение составляет 16Гс. Таким образом, ошибка определения величин в изучаемом колебательном процессе оказывается меньше 10% .

Уже при обработке магнитограмм длительностью несколько десятков часов, нам удалось выделить в спектрах мощности пятен (на уровне достоверности

$>3\sigma$) две новые низкочастотные моды с периодами около 250 и 480 минут, причем амплитуда этих колебаний монотонно увеличивалась с ростом периода.

Для решения вопроса о существовании предельной низкочастотной моды колебаний пятен потребовались временные ряды длительностью в несколько суток. Для выявления и анализа спектральных компонент использовался комплексный непрерывный вейвлет Морле 5-го порядка.

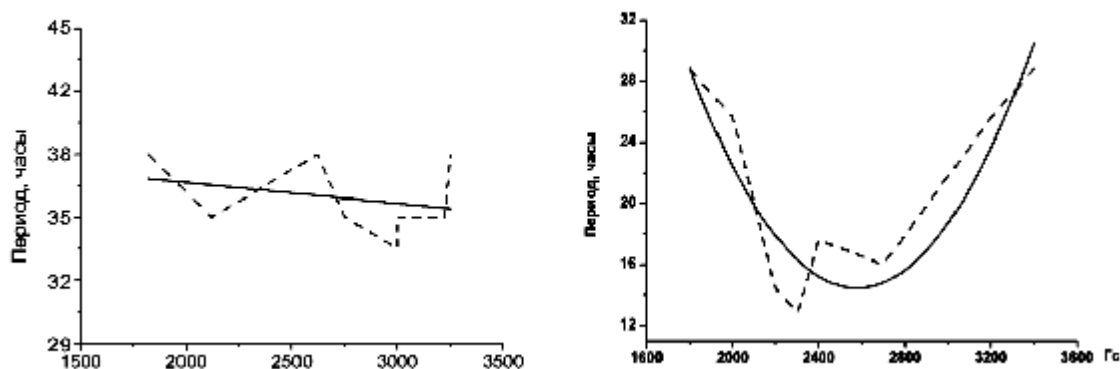


Рис.6. Данные SDO/HMI, слева: зависимость периода колебаний магнитного поля от среднего значения поля $H_z(\theta=0)$ в пятне для моды M2, справа: та же зависимость для собственной предельной моды M1.

Результаты обработки всех серий магнитограмм дают уверенные непротиворечивые результаты. Нам удалось выявить как ранее найденные в наземных наблюдениях периоды 40, 80, 240 минут, так и новые долгопериодические длительностью ~ 480 , ~ 1000 минут. Предельной низкочастотной модой (M1) колебаний магнитного поля солнечного пятна как целого является мода с периодом 800 - 1300 минут. Ее период существенно и нелинейным образом зависит от величины магнитного поля пятна (рис.6 справа).

Предельная колебательная мода устойчиво существует в пятнах на протяжении 1-2 суток. Это время совпадает со средним временем жизни ячейки супергранулы. Напротив, наблюдаемая в спектре мощности мода (M2) с периодом около 2100 - 2880 минут, по-видимому, не является собственной, поскольку ее период не зависит от величины магнитного поля пятна (рис.6 слева). Она может рассматриваться как квазипериод внешней возбуждающей силы, обусловленной динамическими возмущениями пятна со стороны окружающих его ячеек супергрануляции.

В параграфе 5.2.6. излагаются первые результаты обработки длинных серий магнитограмм, полученных на приборе HMI новой космической

обсерватории SDO. Применен новый метод стабилизации FITS изображения, позволяющий решать такие малодоступные для MDI(SOHO) задачи как, например, пространственное распределение мощности колебаний в пятне, коррелированность колебаний пятна или его фрагментов между собой и околосолнечными магнитными элементами. Угловое разрешение новой обсерватории в 4 раза лучше, чем SOHO. Пробная обработка материалов космического аппарата HMI(SDO) уверенно выявила существование предельной низкочастотной моды колебаний пятен и подтвердила результаты, полученные нами ранее по материалам аппарата MDI(SOHO). Выявлена синхронность долгопериодических колебаний отдельных участков тени солнечного пятна. Это свидетельствует о том, что пятно участвует в колебательном процессе как единое, целостное физическое образование, несмотря на наличие в нем тонкой и сложной внутренней структуры магнитного поля.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Впервые реализована концепция большого мобильного солнечного телескопа открытого типа, с короткими оптическими путями большой апертуры. Телескоп обеспечил систематическое получение фотографий и спектрограмм Солнца с высоким пространственным разрешением на протяжении цикла солнечной активности.
2. Развито новое направление использования телевизионных методов регистрации изображений для солнечной спектроскопии. Создан новый тип солнечного спектрогелиографа - магнитографа, основанного на преобразовании стандартного телевизионного сигнала с частотой строк 16565Гц в малокадровый видеосигнал с частотой строк 50 Гц.
3. Создана методика исследования колебательных процессов в атмосфере Солнца одновременно по нескольким спектральным линиям с компенсацией атмосферных дрожаний изображения. Разработан метод получения лучевых скоростей с помощью цифровой камеры. Разработана методика обработки FITS магнитограмм космических аппаратов SOHO/MDI и SDO/HMI с компенсацией вращения Солнца и собственного движения пятна. Реализовано получение телевизионных изображений Солнца с высоким пространственным и временным разрешением в ИК линии гелия HeI $\lambda 10830\text{\AA}$.
4. Разработаны новые методы организации процесса астрономических наблюдений. Создан дистанционный доступ через Интернет к данным, получаемым с видеокамеры солнечного телескопа, с управлением режимом

формирования и выборки данных, доставляемых пользователю, и с передачей данных наблюдений по специальному прикладному протоколу в теле HTTP-сообщения.

5. В результате применения при наблюдениях новых инструментов и методов обработки, получена большая совокупность новых знаний о структурах разного масштаба в атмосфере Солнца. Например:

а). По высококачественным стратосферным снимкам фотосферы уверенно выделены в спектре мощности яркости компоненты соответствующие размерам 10.0", 4.5", 2.4" (мезогранула, скопление гранул и грануляция).

б). Наблюдения на телевизионном магнитографе в линии HeI $\lambda 10830\text{\AA}$ показали, что изменение числа темных гелиевых точек, видимых на диске Солнца, происходит в противофазе с 11-летним циклом активности пятен. В большинстве темных гелиевых точек наблюдается движение плазмы вниз со скоростью в несколько км/сек.

в). Обработка памирских спектрограмм с высоким пространственным разрешением выявила важные особенности в движении грануляции, в частности вращение гранул.

г). Изучена эволюция сложных групп пятен: показано, что протонные вспышки приводят в интервале нескольких минут к упрощению структуры продольных магнитных полей и самой группы. Ленты протонных вспышек, волокна и яркие флоккульные цепочки, располагаются над светлыми коридорами из ярких точек внутри тени и полутени пятен.

д). Впервые найден весь спектр низкочастотных собственных колебаний солнечных пятен. Предельной низкочастотной модой колебаний магнитного поля солнечного пятна как целого является мода с периодом 800 - 1300 минут. Ее период существенно и нелинейным образом зависит от величины магнитного поля пятна.

е). Кроме предельной моды в колебательных спектрах пятен выявляются и более высокие моды в полосах 40-45, 60-80, 135-170, 220-240 и 480-520 минут, причем мощность колебаний в этих полосах монотонно и быстро падает к малым периодам, что характерно для обертонов, возникающих вследствие нелинейного характера колебаний.

ж). Предельная колебательная мода устойчиво существует в пятнах на протяжении 1,5-2 суток, что совпадает со средним временем жизни ячейки супергранулы. Наблюдаемая в спектре мощности мода с периодом около 2100- 2880 минут не является собственной, поскольку ее период не зависит от величины магнитного поля. Она, вероятно, может рассматриваться как квазипериод внешней возбуждающей силы, обусловленной динамическими возмущениями пятна со стороны окружающих его ячеек супергрануляции.

- и). В отличие от короткопериодических 3-5 минутных мод, амплитуда долгопериодической моды колебаний лучевой скорости в солнечном пятне резко убывает с высотой: эти колебания отчетливо проявляются в линии, образующейся на высоте 200 км, и практически не видны в линии с высотой образования 500 км. Это говорит о разной физической природе короткопериодических и долгопериодических колебаний солнечного пятна.
- к). Установлена синхронность долгопериодических колебаний отдельных участков тени солнечного пятна.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

(первые 11 работ из списка журналов, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторской диссертации)

1. Ogir M.B., Parfinenko L.D., Stoyanova M.N. Some results of morphological study of the evolution of the active region of July, 1982. // *Solar Physics*, 102, p.67-78, 1985
2. Parfinenko L.D. HeI Dark Points and 11-year solar cycle.// *Solar Physics*, №132, p.195-197, 1991
3. Парфиненко Л.Д. О структуре атмосферы Солнца, наблюдаемой в линии HeI $\lambda 10830\text{\AA}$.// *Астрономический Журнал*, т.68, в.2, стр.404-410, 1991
4. Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д. О короткопериодических колебаниях магнитного поля в тени солнечного пятна.// *Астрономический журнал*, т.73, №1, стр. 103-108, 1996
5. Ikshanov R.N., Parfinenko L.D., Efremov V.I. On the organization of fine structure of the solar photosphere.// *Solar Physics*, №170, p.205-215, 1997
6. Parfinenko L.D. Research of sunspot oscillations, I. The pulkovo ccd spectroheliograph – magnetograph.// *Solar Physics*, vol. 213, №2, p.291, April 2003
7. 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*, том 84, №5, с. 450–460, 2007
8. Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А. Метод прямого измерения доплеровских смещений и эффекта Зеемана по оптическим цифровым спектрограммам Солнца и долгопериодические колебания солнечных пятен.// *Оптический журнал*, Т.75, №3, С.9-17, 2008
9. Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А. Высотная зависимость мощности коротко- и долгопериодических колебаний в солнечном пятне и его окрестности.// *Космические исследования*, №4, с.311, 2009
10. Efremov V.I., Parfinenko L.D., Soloviev A.A. Investigation of long-period oscillations of sunspots using ground-based observations (Pulkovo) and instrumental MDI (SOHO) data.// *Solar Physics*, v. 267. Issue2. P.279, 2010
11. Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А. Колебания солнечных пятен по магнитограммам MDI (SOHO). // *Космические исследования*, v.49, №3, 2011

12. Бабаджанянц М.К., Парфиненко Л.Д. Исследование возможности применения суперорбитиков в астрофизике.// *Труды АО ЛГУ*, т.ХХVIII, №359, вып.47, стр.57, 1971
13. Парфиненко Л.Д. Телевизионная регистрация солнечного спектра II.// *Солнечные Данные*, №9, стр.84-89, 1971
14. Парфиненко Л.Д. Телевизионная регистрация солнечного спектра I.//*Солнечные Данные*, №6, стр.95-99, 1972
15. Ленцман В.Л., Парфиненко Л.Д. Выявление быстрых изменений тонкой структуры полутени пятна, *Солнечные Данные*, №11, стр.92-94, 1972
16. Парфиненко Л.Д. Обработка изображений солнечной фотосферы методом фильтрации пространственных частот и дискриминации по яркости.// *Солнечные Данные*, №11, стр.89-91, 1972
17. Парфиненко Л.Д. Телевизионная регистрация солнечного спектра III.// *Солнечные Данные*, №12, стр.72-78, 1972
18. Парфиненко Л.Д. Регистратор дрожаний и анализатор резкости солнечного изображения.// *Солнечные Данные*, №1, стр.76-78, 1973
19. Ленцман В.Л., Парфиненко Л.Д. О короткопериодических изменениях магнитного поля локальных образований активной области Солнца.// *Солнечные Данные*, №12, стр.94, 1975
20. Ленцман В.Л., Парфиненко Л.Д. Несимметричность поля лучевых скоростей в солнечной хромосфере.// *Солнечные Данные*, №12, стр.94, 1975
21. Ленцман В.Л., Парфиненко Л.Д. Пулковский телевизионный спектрогелиограф. // *Солнечные Данные*, №6, стр.80, 1976
22. Парфиненко Л.Д., Михалев В.Ф. Опытные наблюдения Солнца с высоким разрешением на Памире.// *Солнечные Данные*, №8, стр.92-97, 1978
23. Парфиненко Л.Д. Телевизионные наблюдения сопутствующих магнитных полей.// *Солнечные Данные*, №11, стр.97-99, 1979
24. Парфиненко Л.Д. О тонкой структуре светлых колец солнечных пятен.// *Солнечные данные*, №7, стр.85, 1980
25. Парфиненко Л.Д. О светлых точках в тени пятна.// *Солнечные данные*, №2, стр.76, 1980
26. Парфиненко Л.Д. О явлении цепочек в фотосферной грануляции.// *Солнечные Данные*, №10, стр.101, 1981
27. Парфиненко Л.Д. О тонкой структуре светлых мостов.// *Солнечные Данные*, №12, стр.79, 1981
28. Парфиненко Л.Д. Наблюдения Солнца на Памире.// *Международный ежегодник изд. «Знание», «Наука и Человечество»*, стр.317, 1981
29. Парфиненко Л.Д. К вопросу о связи вспышечной активности с быстрыми изменениями магнитного поля.// *Солнечные Данные*, №3, стр.103-107, 1982
30. Парфиненко Л.Д. О быстрых изменениях контраста ярких деталей полутени.// *Солнечные Данные*, №5, стр.86-92, 1982
31. Парфиненко Л.Д. Микропоры как возможное проявление тонкой структуры магнитного поля в фотосфере.// *Солнечные Данные*, №3, стр.102-107, 1983
32. Огирь М.Б., Парфиненко Л.Д. и Стояновой М.Н. К вопросу о вспышечной активности июльской группы 82г.// *Солнечные Данные*, №9, стр.77-85, 1984

33. Парфиненко Л.Д., Крюндаль А.В. Особенности развития июльской группы 83г.// *Солнечные Данные*, №10, стр.63, 1984
34. Парфиненко Л.Д. Опыт высокогорных наблюдений Солнца на Памире.// *Изв. ГАО РАН*, №203, 1985
35. Крат В.А., Парфиненко Л.Д. и Стоянова М.Н. К вопросу о серых порах в фотосфере Солнца. *Солнечные Данные*, №3, стр.60-65, 1985
36. Парфиненко Л.Д. Получение изображения Солнца в линии гелия $\lambda 10830\text{\AA}$ телевизионным методом.// *Солнечные Данные*, №2, стр.87-91, 1985
37. Парфиненко Л.Д. О некоторых особенностях тонкой структуры лучевых скоростей солнечной грануляции.// *Солнечные Данные*, №8, стр.68-73, 1985
38. Ихсанов Р.Н., Парфиненко Л.Д. О некоторых свойствах темных гелиевых точек, наблюдаемых в линии HeI $\lambda 10830\text{\AA}$. // *Солнечные Данные*, №9, стр.89-92, 1987
39. Парфиненко Л.Д. К вопросу о темных гелиевых точках, наблюдаемых в линии HeI $\lambda 10830\text{\AA}$.// *Солнечные Данные*, №11, стр.91-95, 1989
40. Парфиненко Л.Д., Парфиненко Н.К. Связь количества темных точек, наблюдаемых в линии HeI $\lambda 10830\text{\AA}$ и количества светлых узлов в линии KCaII с циклом солнечной активности.// *Солнечные Данные*, № 7, стр. 91-95, 1990
41. Никонов О.В., Парфиненко Л.Д. и др. Некоторые результаты оптических исследований на Кубе.// *Сборник Астрофотография в исследованиях Вселенной*, Л. 1992
42. Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д. О крупномасштабной структуре атмосферы Солнца.// *Изв. ГАО РАН*. №211, стр.198-205, 1996
43. Вахтов В.Н., Парфиненко Л.Д. и др. Микрофотометрический комплекс МФК-200.// *Изв. ГАО РАН*. №211, стр.213-218, 1996
44. Парфиненко Л.Д., Макаров О.Г. Пулковский CCD спектрогелиограф - магнитограф.// *Солнечные данные* 1995-1996, стр.136-144, 1997
45. Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д. Исследование крупномасштабной структуры по колебательным процессам в атмосфере Солнца. // *Изв. ГАО РАН*, 1998
46. Парфиненко Л.Д. К вопросу о гигантских ячейках в атмосфере Солнца.// *Труды международной конференции «Новый цикл активности Солнца»: наблюдательный и теоретический аспекты*, С.Петербург, Пулково, 23-29.06.98, стр. 245-248, 1998
47. Парфиненко Л.Д. Пулковский спектрогелиограф-магнитограф на CCD-матрице.// *Труды международной конференции «Новый цикл активности Солнца»: наблюдательный и теоретический аспекты*, С.Петербург, Пулково, 23-29.06.98, стр.141-144, 1998
48. Парфиненко Л.Д., Дорофеюк А.С. Проект солнечного спектрографа со скрещенной дисперсией.// *Труды международной конференции «Новый цикл активности Солнца»: наблюдательный и теоретический аспекты*, С.Петербург, Пулково, 23-29.06.98, стр.337-340, 1998
49. Ихсанов Р.Н., Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д. Особенности короткопериодических колебаний магнитного поля и лучевых скоростей в солнечных пятнах.// *Труды конференции "Крупномасштабная структура солнечной активности"*, Пулково 21-25 июня 1999г, стр.87-92, 1999

50. Парфиненко Л.Д., Ефремов В.И. Крупномасштабная структура хромосферы.// *Труды конференции "Крупномасштабная структура солнечной активности"*, Пулково 21-25 июня 1999г.
51. Ихсанов Р.Н., Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д. О колебаниях магнитного поля в солнечных пятнах.// *Изв. ГАО РАН*. №315, стр.185-194, 2000
52. Парфиненко Л.Д. К вопросу о светлых кольцах солнечных пятен.//*Труды конференции "Солнце в эпоху смены знака магнитного поля"*, 28.05-1.06, С.Петербург, Пулково, 2001
53. Игнатъев М.Б., Пинигин Г.И., Парфиненко Л.Д. Astronomical education on the base of virtual consolidation of observatories.// *Труды конференции "Расширение и связь опорных координатных систем с использованием ПЗС наземной техники"*, 10-13 октября, Николаев, Украина, 2001
54. Бобков Е.В., Парфиненко Л.Д., Соченов Ю.Е., Шейнин Ю.Е., Ульянов И. Дистанционный доступ к солнечному телескопу через интернет.//*Изв. ГАО РАН*, №216, с.505, 2002
55. Ефремов В.И., Ихсанов Р.Н., Парфиненко Л.Д. Колебания магнитного поля в тени пятна. *Труды международной конференции "Климатические и экологические аспекты солнечной активности"* (7-11.07.2003, Санкт-Петербург, ГАО РАН), стр.165, 2003
56. Parfinenko L.D. The Pulkovo CCD spectroheliograph-magnitograph.// *Proceedings of IAU Symposium 223 "Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity"*, 14-19 June, p.657-658, St.Peterburg, 2004
57. Efremov V.I., Ihsanov R.N., Parfinenko L.D. Oscillations of magnetic field in a sunspot umbra.//*Proceeding IAU Symposium 223*, 14-19 June, p.708-711, St.Peterburg, 2004
58. Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д. Получение лучевых скоростей из цифровых изображений солнечного спектра.// *Изв. ГАО РАН*, №217, 2004
59. Парфиненко Л.Д., Гроздилов В.М. Робот-телескоп на базе параллактической монтировки АПШ-40.// *Изв. ГАО РАН*, №217, с.499-505, 2004
60. Ефремов В.И., Ихсанов Р.Н., Парфиненко Л.Д. Research of radial velocities in active areas of the sun.// *Труды IX Пулковской международной конференции «солнечная активность как фактор космической погоды»*, 4-9 июля 2005г, с.643-649, Санкт-Петербург, 2005
61. Ефремов В.И., Ихсанов Р.Н., Парфиненко Л.Д. Исследование колебаний магнитного поля в тени солнечного пятна с помощью CCD спектрогелиографа-магнитографа.// *Труды международного научного семинара «Физика Солнца и звезд»*, март 2005г., с.151, Калмыцкий госуниверситет, Элиста, 2005
62. Парфиненко Л.Д., Гроздилов В.М. Высокоэффективное использование телескопов умеренного размера.// *Труды международного научного семинара «Физика Солнца и звезд»*, март 2005г., с.51, Калмыцкий госуниверситет, Элиста, 2005
63. Парфиненко Л.Д. Новые методы получения и обработки оптической информации для исследования Солнца.// *в сборнике ПРАКТИКУМ ПО АСТРОНОМИИ*, (под ред. Г.И.Пинигина), УДК 521-522, П. 69, ISBN 966-8147-42-1, Изд. Атолл, стр.5 – 55, 2005
64. Ефремов В.И., Ихсанов Р.Н., Парфиненко Л.Д. Колебания лучевых скоростей на разных высотах в активных областях Солнца (совм. с В.И.Ефремовым,

- Р.Н.Ихсановым), Труды X международной Пулковской конференции, СПб, ГАО РАН. 2006
65. Ефремов В.И., Ихсанов Р.Н., Парфиненко Л.Д. Колебания лучевых скоростей с высотой в активных областях Солнца.// *Труды Всероссийской конференции «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности»*, 28 сентября - 2 октября 2006г, САО РАН, п. Нижний Архыз, 2006
 66. Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А. Особенности долгопериодических колебаний лучевых скоростей в солнечных пятнах». // *Изв. ГАО РАН*, №219, 2006
 67. Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А. Особенности высотного распределения мощности низкочастотных колебаний солнечного пятна.// *Труды XI ежегодной Пулковской конференции по физике Солнца*, 2007
 68. Ефремов В.И., Ихсанов Р.Н., Парфиненко Л.Д. Колебания лучевых скоростей на разных высотах фотосферы в спокойных и активных областях Солнца.//*Труды XI ежегодной Пулковской конференции по физике Солнца*, 2007
 69. Абрамов-Максимов В.Е., Гельфрейх Г.Б., Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьевым А.А. Особенности проявления долгопериодических и короткопериодических колебаний солнечных пятен в оптическом и радиодиапазонах.// *Труды XI ежегодной Пулковской конференции по физике Солнца*, 2007
 70. Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А. Некоторые пространственные особенности долгопериодических колебаний лучевых скоростей в пятне и около него.//*Труды XII ежегодной Пулковской конференции по физике Солнца*, 2008
 71. Parfinenko L.D., Efremov V.I., Soloviev A.A., Kirichek E.A. Long-period oscillations of sunspots detected by doppler shifts on digital spectroheliograms.// *PROCEEDINGS First Middle East-Africa, Regional IAU Meeting, Cairo, Egypt*, April 5-10, 2008
 72. Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А. Результаты обработки длинных серий магнитограмм MDI(SOHO).//*Труды XIII ежегодной Пулковской конференции по физике Солнца*, 2009
 73. Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А. Об артефакте, возникающем при спектральной обработке серий цифровых снимков солнечных пятен полученных на MDI (SOHO).//*Труды XIII ежегодной Пулковской конференции по физике Солнца*, 2009
 74. Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А. Новые результаты исследований колебаний солнечного пятна как целого, полученные по данным MDI (SOHO).// *Труды XIV ежегодной Пулковской конференции по физике Солнца*, 2010