

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт солнечно-земной физики  
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Шиховцев Артем Юрьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЗЕМНОЙ  
АТМОСФЕРЫ И УСЛОВИЙ КОРРЕКЦИИ СОЛНЕЧНЫХ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность 01.03.03 – физика Солнца

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



Научный руководитель –  
Доктор физико-математических наук,  
Ковадло П.Г.

Иркутск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки в Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук профессор Ковадло Павел Гаврилович  
старший научный сотрудник Институт солнечно-земной физики, г.Иркутск

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук Носов Виктор Викторович  
ведущий научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

кандидат физико-математических наук  
Корниенко Геннадий Иванович  
директор Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН, г. Уссурийск

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург

Защита состоится « \_\_\_\_\_ » 2016 г. в « \_\_\_\_\_ » часов на заседании диссертационного совета Д 003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126а, а/я 291.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <http://www.iszf.irk.ru>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » 201 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических  
наук

Поляков В.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность и степень разработанности темы исследований

При исследовании солнечных образований мы сталкиваемся с явлением их структуризации: с объединением мелкомасштабных структур в крупномасштабные и наоборот [1]. Знание информации о физической природе явлений самых различных масштабов на Солнце является необходимым для развития представлений о генерации и диффузии магнитных потоков, о движениях солнечного вещества, а также для понимания роли различных масштабов в порождении и разрушении солнечных пятен. Исследования солнечных пятен, являющихся одним из основных проявлений солнечной активности, условий их возникновения и эволюции, а также грануляции фотосферы представляют собой одну из фундаментальных задач современной физики Солнца. Именно с активными областями связаны такие проявления солнечной активности как солнечные вспышки, эruptionи солнечных волокон, корональные выбросы масс.

Современные задачи наблюдательной астрофизики, такие как, изучение тонкой структуры Солнца, явлений и процессов, происходящих на малых масштабах, требуют получения разрешения порядка 0,1 угловой секунды и лучше, а в идеале приближения к дифракционному пределу разрешения оптического инструмента. Разрешающая способность и эффективность работы солнечного телескопа в целом определяются оптической нестабильностью земной атмосферы (ОНЗА), под которой понимается набор турбулентных неоднородностей показателя преломления воздуха по лучу зрения инструмента. Оптическая нестабильность земной атмосферы ухудшает условия регистрации изображений и снижает разрешающую способность наземных телескопов. Так из-за влияния земной турбулентной атмосферы солнечные телескопы наземного базирования в лучших местах в среднем имеют разрешение не лучше 1 – 2 угловых секунд. Неоднородности показателя преломления воздуха в канале распространения волны, возникающие из-за атмосферной турбулентности, вызывают такие эффекты, как дрожание, мерцание и размытие внутренней структуры изображений, понижая их информативность. Эти эффекты особенно проявляются для солнечных телескопов, которые, как правило, работают в условиях интенсивной атмосферной турбулентности. Известно, что разрешение порядка 0,1 угловой секунды и лучше для наземных солнечных телескопов в режиме реального времени можно обеспечить с помощью применения систем адаптивной оптики (АО). Концептуальная основа систем АО включает в себя определение искажений волнового фронта (аберраций) и их коррекцию с высокой скоростью в режиме реального времени. Пример неадаптированного солнечного изображения, полученного в фокусе Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) с диаметром апертуры 760 мм, показан на рис.1 а). На рис.1 б) показано изображение солнечного пятна, полученного на солнечном телескопе Dunn (диаметр апертуры 760 мм), с использованием адаптивной оптической системы и спекл-обработки.

Повышение разрешающей способности и информативности телескопов наземного базирования является важной фундаментальной проблемой современной физики, возникающей в процессе наблюдений мелкомасштабной структуры Солнца.

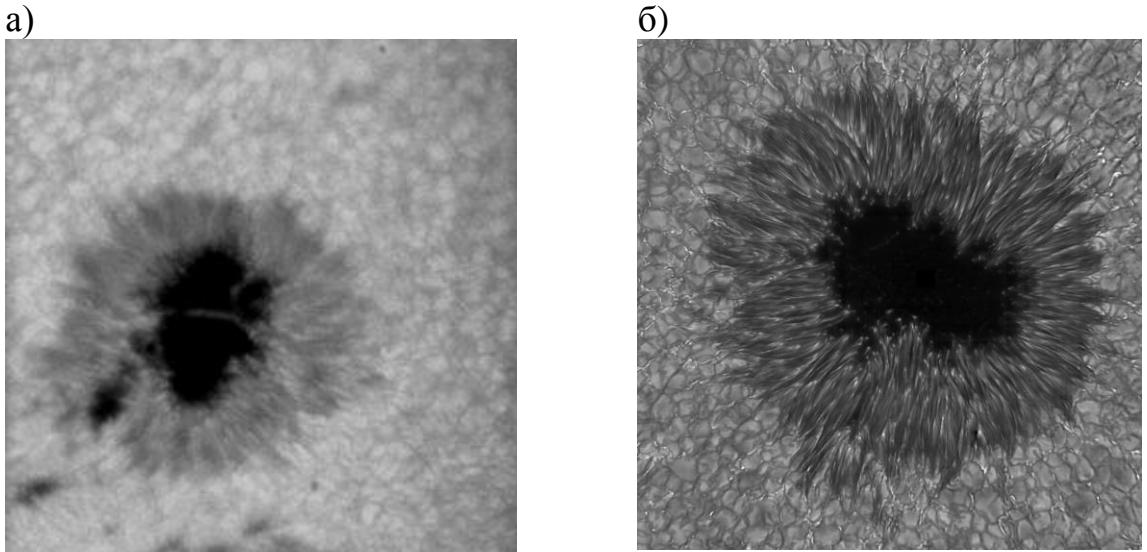


Рис.1 а) Пример неадаптированного солнечного изображения, полученного в фокусе Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ), б) изображение солнечного пятна, полученное на солнечном телескопе Dunn с использованием адаптивной оптической системы и спекл-обработки

Разработка и внедрение системы АО, особенно для солнечного телескопа, работающего в условиях дневной турбулентности – это всегда длительный трудоемкий процесс, в котором важное место занимают вопросы теории дифракции световых волн на атмосферных неоднородностях, качества информации о трехмерной структуре и временных вариациях мелкомасштабной турбулентности атмосферы в конкретном пункте расположения инструмента и др. При этом специфика коррекции солнечных изображений при помощи адаптивной системы состоит в том, что необходимо не только стабилизировать случайные смещения изображения, как целого (дрожания), но и корректировать геометрию отдельных фрагментов изображения и их яркость. Все крупные обсерватории мира оснащаются сложными комплексами приборов для текущего мониторинга характеристик оптической нестабильности земной атмосферы и, основанной на этих данных, последующей коррекции изображений. В последние годы идет широкое внедрение систем АО в уже работающие астрономические (солнечные и звездные) телескопы. При этом уникальные астрономические телескопы РФ получают новые информационные возможности, увеличивается их эффективность. Настоящая работа является развитием данного направления. Результаты изучения особенностей оптической нестабильности атмосферы, с точки зрения возможностей коррекции турбулентных искажений изображений, могут быть использованы при создании системы АО в проектах современных крупноапертурных

телескопов. Например, эти результаты используются при проектировании адаптивной системы нового крупного солнечного телескопа (КСТ) с диаметром главного зеркала 3 м.

Параметры систем АО определяются не только техническими характеристиками самого телескопа, но также и структурными особенностями и временными вариациями турбулентности. Коррекция солнечных изображений с помощью адаптивных оптических систем наиболее эффективна в пунктах с низким уровнем энергии турбулентности. Поиск таких мест является одной из проблем современной наблюдательной астрономии.

Помимо интегральных характеристик оптической нестабильности при разработке классических систем АО необходима информация об турбулентности отдельных атмосферных слоев. Знание высот наиболее турбулизированных слоев необходимо также для мультисправленных систем АО, применяемых для исправлений искажений волнового фронта в широком поле зрения.

Проблема заключается в отсутствии стандартизованных данных о пространственном распределении характеристик мелкомасштабной турбулентности в «оптически активных» слоях атмосферы. Это связано с тем, что прямые измерения оптических характеристик проводятся в рамках отдельных исследовательских программ и для ограниченных территорий с помощью различных инструментов. Применяемые инструменты для оценки астроклиматических параметров, как правило, имеют малые размеры апертур и обладают фильтрующими особенностями.

Таким образом, возникает потребность в разработке методики численной оценки характеристик мелкомасштабной атмосферной турбулентности, в т.ч. оптической нестабильности земной атмосферы, по доступным глобальным архивам данных, накопленным за длительные промежутки времени.

В данной работе развита методика спектральной оценки мелкомасштабных турбулентных характеристик с использованием информации о крупномасштабных «энергонесущих» атмосферных неоднородностях для атмосферного пограничного слоя и свободной атмосферы. Методика основана на учёте особенностей перемешивания воздуха в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Так, зная форму фонового энергетического спектра атмосферной турбулентности в широком пространственных и временных масштабах и характеристики колебаний атмосферных неоднородностей в заданном спектральном интервале, возможно оценить параметры турбулентности в любом другом произвольном интервале, в том числе, и в высокочастотном. Исследование формы и деформаций фонового энергетического спектра атмосферной турбулентности в широком диапазоне частот для различных атмосферных условий, по-прежнему, представляет собой важную задачу.

По предложенной методике, основанной на спектральных особенностях атмосферной турбулентности в широком диапазоне частот можно оценить, например, структурную характеристику флюктуаций показателя преломления воздуха  $C_n^2$ , ее интегральное значение в «оптически активном слое» атмосферы, а также для отдельных высот  $\int_{z_1}^{z_2} C_n^2 dz$ , радиус атмосферной когерентности, изопланатический угол и время когерентности атмосферной турбулентности, а также другие параметры, характеризующие астроклимат места или территории. Полученная информация о параметрах оптической нестабильности земной атмосферы позволяет выявить наилучшие пункты с высоким качеством изображения, выбрать способ коррекции солнечных изображений или отдельных его фрагментов, а также рассчитать параметры адаптивных оптических систем различного порядка.

### **Цель и задачи диссертационной работы**

В диссертационной работе, исходя из практических потребностей наблюдательной астрономии и необходимости определения и прогнозирования качества изображений для различных территорий, поставлена цель: исследовать оптическую нестабильность земной атмосферы и ее связь с атмосферной турбулентностью в широком диапазоне пространственных и временных масштабов.

В соответствии с целью сформированы задачи:

1. Исследовать формы и деформации энергетических спектров атмосферной турбулентности в широком диапазоне частот для разных условий.
2. Разработать методику оценки характеристик оптической нестабильности, определяющих разрешающую способность солнечных телескопов, основанную на спектральных особенностях атмосферной турбулентности в широком диапазоне частот по накопленным данным сети радиозондовых станций.
3. Исследовать пространственную структуру оптической нестабильности земной атмосферы для выбора расчетным способом пунктов с высоким качеством изображения, наиболее пригодных для установки солнечных крупноапertureных телескопов наземного базирования, а также для определения параметров адаптивных оптических систем.

### **Методы исследования**

Решение поставленных задач осуществлялось с помощью экспериментальных и теоретических методов исследований.

Экспериментальные исследования оптических и турбулентных характеристик атмосферы осуществлялись с помощью ультразвуковой метеостанции «Метео-2», датчика Шака-Гартмана адаптивной оптической системы Большого вакуумного телескопа и дифференциального монитора дрожания изображений.

Теоретические исследования осуществлялись в рамках подходов, применяемых при решении задач, связанных с распространением оптических волн в турбулентной атмосфере, а также при оптимизации

адаптивных оптических систем. В работе используются положения теории турбулентности, а также теории формирования оптических изображений.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Разработана методика, основанная на учёте спектральных особенностей турбулентности в широком диапазоне частот, которая позволяет численно оценивать параметры оптической нестабильности земной атмосферы, применяемые при проектировании и подстройке адаптивных оптических систем коррекции солнечных изображений.
2. Установлено, что в высокочастотной части фонового энергетического спектра, соответствующего атмосферному пограничному слою, в диапазоне адаптации солнечных изображений, образуется «ступенька», где спектральная плотность флуктуаций зависит от частоты в степени, изменяющейся от минус «5/3» до плюс 2.
3. По результатам экспериментальных и численных исследований установлено, что в месте расположения Саянской солнечной обсерватории среднее качество изображения для длины волны 0,5 мкм в утренние часы составляет 1,6 угловой секунды, в дневное время – 2,2 угловой секунды. Получено, что уровни сопряжения адаптивных оптических систем коррекции солнечных изображений, учет которых необходим для расширения корректируемого поля зрения солнечного телескопа, располагаются на высотах 1 и 10 км.
4. На основе разработанной методики выявлены и рекомендованы новые пункты с высокими астроклиматическими показателями для строительства солнечных телескопов: отдельные изолированные вершины северной части Мадагаскара, восточной части Австралии, южной части Аравийского полуострова; для территории России – Алданского нагорья и юга Читинской области.

**Научная новизна**

1. Выполнено исследование формы фоновых энергетических спектров атмосферной турбулентности в широком диапазоне пространственных и временных масштабов в зависимости от параметров крупномасштабных атмосферных неоднородностей, в том числе в области оптической нестабильности земной атмосферы (с масштабами сопоставимыми с диаметром апертуры оптических инструментов). По результатам исследований показано, что интенсивность фоновой мелкомасштабной турбулентности в свободной атмосфере и пограничном слое определяется энергией низкочастотных компонент турбулентности и тем, как структурированы атмосферные неоднородности в широком диапазоне пространственных и временных масштабов.
2. Впервые разработана методика расчета характеристик оптической нестабильности земной атмосферы, основанная на учёте спектральных особенностей турбулентности в широком диапазоне частот. В частности, методика позволяет численно оценивать астроклиматические характеристики и параметры при создании оптимальных адаптивных оптических систем для

наземных крупных солнечных телескопов (в месте расположения Саянской солнечной обсерватории и Байкальской астрофизической обсерватории).

3. Впервые получено пространственное распределение по территории земного шара радиуса атмосферной когерентности, определяющего разрешающую способность наземных телескопов, на основе спектральных особенностей турбулентности в широком диапазоне частот. Выполнено комплексное астроклиматическое исследование по территории России, которое включает: продолжительность солнечного сияния, уровень рассеянного света, оптическую нестабильность земной атмосферы (в том числе отдельных оптически активных слоев) и ее сезонные особенности. По результатам исследований определены новые пункты с высоким качеством изображения и повторяемостью ясного неба.

4. Приведены результаты исследований статистических характеристик качества изображения в месте расположения Саянской солнечной обсерватории. Исследования выполнены на основе анализа данных прямых оптических измерений дрожания солнечного изображения с помощью дифференциального монитора дрожания изображений, анализа более ранних наблюдений, описанных в приложениях к бюллетеню «Солнечные данные. Магнитные поля солнечных пятен» и сопоставления со спектральными расчетами.

**Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается:**

- использованием статистически значимых рядов наблюдений. Для исследования деформаций формы спектра турбулентности в широком частотном диапазоне использовались длительные ряды данных: собственных измерений, выполненных с помощью акустической метеостанции «МЕТЕО-2» в течение 5 лет; высотной метеорологической мачты г. Обнинска в течение нескольких лет; архива NCEP/NCAR Reanalysis за период с 1984 по 2014 гг.;
- применением апробированных численных методов: методов математической фильтрации исходных рядов, статистического и спектрального анализа, методов обработки изображений;
- согласием на качественном и количественном уровне полученных результатов диссертационной работы с выводами, сделанными ранее другими авторами. Полученные результаты исследований изменений формы энергетических спектров турбулентности в широком диапазоне частот находятся в согласии с экспериментальными наблюдениями Настрома и Гейджа, Винниченко Н.К., Ван-дер-Ховена и др. [7,10,11]. Рассчитанные значения энергетической характеристики флюктуаций показателя преломления по спектральной методике совпадают по величине с данными самолетных, аэростатных, наземных и астрономических наблюдений, обобщенными Гурвичем А.С. [2];
- согласованием результатов с современными представлениями о распространении оптических волн и методах оценки дрожания и качества изображений в турбулентной атмосфере;

- согласованием расчетов с результатами собственных экспериментальных наблюдений в месте расположения Байкальской астрофизической обсерватории и Саянской солнечной обсерватории.

Результаты, полученные в ходе работы и вынесенные на защиту, обсуждались на научных семинарах, публиковались в рецензируемых журналах и докладывались на российских и международных конференциях.

### **Апробация работы**

Основные результаты исследований, представленные в диссертации, докладывались на Международной Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике (БШФФ 2009) «Гелио- и геофизические исследования» (Иркутск, 2009), III Всероссийской астрономической конференции «Небо и Земля» (Иркутск, 2011), Международной Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск 2011), XVIII Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Иркутск, 2012), Международной Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» (Иркутск 2013), Всероссийской конференции по солнечно-земной физике, посвященной 100-летию со дня рождения В.Е. Степанова (Иркутск, 2013), Международной научной конференции «Турбулентность и волновые процессы» (Москва, 2013), XX Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Новосибирск, 2014), Международной байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» XIV Конференция молодых ученых. «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 14-18 сентября 2015 г. (Иркутск, 2015).

### **Научная и практическая значимость работы**

*Научная значимость работы* заключается в том, что для расчета характеристик оптической нестабильности земной атмосферы разработана оригинальная методика, основанная на учёте спектральных особенностей турбулентности в широком диапазоне частот. Методика позволяет численно оценивать энергетическую постоянную флуктуаций показателя преломления, ее вертикальные изменения, изопланатический угол, радиус и время атмосферной когерентности. Полученные оценки могут служить основой при разработке адаптивных оптических систем коррекции изображений. Для повышения точности методики исследованы деформации формы фонового энергетического спектра турбулентности в широком диапазоне частот для разных «оптически активных» слоев атмосферы. Установлено, что в высокочастотной части фонового энергетического спектра, соответствующего атмосферному пограничному слою, в диапазоне адаптации солнечных изображений, образуется «ступенька», где спектральная плотность флуктуаций зависит от частоты в степени, изменяющейся от минус 5/3 до плюс 2. В низкочастотной части (с соответствующими масштабами порядка нескольких суток) фоновый спектр, соответствующий

атмосферному пограничному слою, при небольших скоростях ветра отличается от формы, предсказываемой квазигеострофической моделью турбулентности (в которой спектральная плотность флюктуаций  $E(f)$  пропорциональна частоте  $f^{-3}$ ) и аппроксимируется зависимостью вида  $E(f) \sim f^{-5/3}$ .

*Практическая значимость работы* заключается в том, что по результатам применения оригинальной методики впервые получены пространственное распределение по территории земного шара радиуса атмосферной когерентности для длины волны электромагнитного излучения 0,5 мкм, величина которого определяет разрешающую способность наземных телескопов. Это дало возможность выявить новые пункты с наиболее благоприятными астроклиматическими условиями (с высоким качеством изображений с учетом повторяемости ясного неба). По результатам исследований наряду с известными лучшими (обсерваториями, расположенными на территории Чили) выявлены новые пункты с высокими астроклиматическими показателями: отдельные изолированные вершины северной части Мадагаскара, южной части Аравийского полуострова; для территории России – Алданского нагорья и юга Читинской области.

Полученные результаты практически могут быть использованы для оптимизации работы адаптивных оптических систем и повышения эффективности коррекции изображений, например, для их подстройки под различные атмосферные условия. В том числе, для выбора типа адаптивной оптической системы и определения параметров ее элементов, а также характерных атмосферных уровней интенсивной турбулентности, информация о которых необходима для увеличения корректируемого поля зрения телескопа в мультиспиральных системах коррекции. В частности, результаты исследований использованы в техническом задании крупного солнечного телескопа (КСТ), запланированного в рамках мегапроекта «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН».

### **Личный вклад автора**

Автор принимал участие на всех этапах настоящего исследования: в постановке задач, в поиске возможных способов их решения, в экспериментальных и численных исследованиях, а также в обсуждении полученных результатов.

Совместно с сотрудниками ИСЗФ СО РАН и ИОА СО РАН выполнены серии прямых оптических измерений качества изображений с помощью датчика волнового фронта Шака-Гартмана, установленного в адаптивной оптической системе Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ). Оптические измерения осуществлялись по разным фрагментам солнечных изображений: по краю солнечного диска, по солнечному пятну и грануляции.

Автор непосредственно участвовал в работах по установке и юстировке адаптивной оптической системы БСВТ.

Автором синхронно с оптическими наблюдениями осуществлялись акустические измерения микротурбулентных характеристик с помощью

метеостанции «Метео-2». По результатам измерений оценены значения структурной энергетической постоянной флюктуаций показателя преломления и радиуса когерентности внутри павильона и на площадке БСВТ, а также определен вклад, вносимый турбулентностью над оптическим столом.

В месте расположения Саянской солнечной обсерватории автором (в том числе совместно с сотрудниками ИОА СО РАН) проведены наблюдения дрожания края солнечных изображений с помощью фотоэлектрического регистратора Брандта, установленного в оптической схеме Автоматизированного солнечного телескопа.

Автор непосредственно участвовал в обработке данных собственных и совместных измерений, выполненных в течение длительного временного интервала с помощью фотоэлектрического регистратора Брандта дрожания края солнечных изображений, датчика волнового фронта Шака-Гартмана, акустической метеостанции «Метео-2». Результаты собственных наблюдений, а также архивные данные Национального центра по прогнозу состояния окружающей среды / Национального центра атмосферных исследований NCEP/NCAR Reanalysis и данные длительных измерений на высотной метеорологической мачте г. Обнинска были использованы для исследований деформаций формы спектра турбулентности в широком диапазоне частот. Кроме этого, по результатам обработки данных NCEP/NCAR Reanalysis были получены пространственные распределения фоновых характеристик оптической нестабильности атмосферы и качества изображений за длительные временные интервалы (с 1984 по 2014 г.).

Все представленные результаты в настоящей диссертационной работе получены автором самостоятельно или при непосредственном участии в коллективе соавторов. Автор самостоятельно подготавливал доклады и представлял их на конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Общий объем работы 171 страница, работа содержит 3 таблицы, 90 рисунков, список цитируемой литературы содержит 172 источника.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследований оптической нестабильности земной атмосферы и турбулентности, которые определяют астроклимат места и, как следствие, разрешающую способность телескопов наземного базирования. Также обсуждается проблема поиска новых мест для установки крупных солнечных телескопов наземного базирования и современное состояние проблемы повышения информативности оптических инструментов, а также эффективности адаптивных оптических систем коррекции изображений. Сформулированы цель и задачи настоящего исследования, новизна, приведены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава носит** обзорный характер и содержит сведения об особенностях работы солнечных телескопов в неоднородной по своим оптическим свойствам земной атмосфере, а также по адаптивной оптике и теории атмосферной турбулентности. В обзоре описаны методологические аспекты определения дрожания и размытия внутренней структуры изображений. Эти эффекты вызываются неоднородностями показателя преломления воздуха по лучу зрения, которые возникают из-за атмосферной турбулентности.

Рассматриваются вопросы, касающиеся систем адаптивной оптики, которые применяются для компенсации искажений волнового фронта в режиме реального времени и становятся неотъемлемой частью наземных телескопов. Современные АО системы для видимого диапазона длин волн способны эффективно корректировать искажения волнового фронта (достигать значений параметра Штреля порядка 0,4 – 0,7) только в условиях слабой и умеренной турбулентности. Показано, что знание оптической нестабильности атмосферы и характеристик отдельных «оптически активных» слоев необходимо при проектировании адаптивных оптических систем различного порядка, а также для их подстройки под конкретные атмосферные условия. Все это обуславливает необходимость длительных исследований, которые служат основой формирования представлений о астроклимате конкретных пунктов.

**Вторая глава посвящена** разработке методики оценки характеристик оптической нестабильности земной атмосферы (в том числе и мелкомасштабной турбулентности): структурной характеристики флуктуаций показателя преломления, радиуса атмосферной когерентности, изопланатического угла и др по накопленным архивам данных радиозондования атмосферы. Методика основана на учёте спектральных особенностей атмосферной турбулентности в широком диапазоне частот. Исследование спектральных особенностей атмосферной турбулентности в широком диапазоне частот для разных атмосферных условий – это важная задача современной физики и атмосферной оптики. Сюда в том числе относится изучение турбулентности в крупномасштабных вихревых течениях, когерентных свойств турбулентности, процессов самоорганизации, упорядоченности и согласованности течений. Один из главных вопросов в настоящем исследовании состоит в том, насколько далеко (долго) может сказываться влияние внешнего течения, а также крупных (низкочастотных) неоднородностей на спектральные компоненты турбулентности более высоких порядков, рассматриваемых в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. В конце концов, представляет интерес влияние турбулентности в широком диапазоне пространственных и временных масштабов на преломляющие свойства среды. При этом необходимо заметить, что исследования параметров оптической нестабильности земной атмосферы показали их высокую синхронизацию с

низкочастотными вариациями температуры [3] и скорости ветра на уровне около 12 км [5,9].

В первой части главы показаны результаты исследований форм и деформаций фоновых энергетических спектров атмосферной турбулентности (флуктуаций скорости ветра и температуры) в широком диапазоне частот для различных атмосферных условий. Отдельно рассматриваются спектры флуктуаций скорости потока и флуктуаций температуры, которые необходимо учитывать при описании оптических свойств среды, особенно в условиях устойчивого пограничного слоя атмосферы. Для исследований флуктуаций разных частот использовались данные собственных измерений в местах расположения Большого солнечного вакуумного телескопа (п. Листвяничное) и Саянской солнечной обсерватории (п. Монды), доступные данные высотной метеорологической мачты г. Обнинска, ассимилированные в узлы сетки данные архива NCEP/NCAR Reanalysis, данные прямых радиозондовых наблюдений на ст. Братск.

На рис. 2 показаны спектры турбулентных флуктуаций температуры в широком диапазоне частот по данным различных исследований. По оси абсцисс отложен логарифм частоты, по оси ординат – логарифм спектральной плотности флуктуаций температуры.

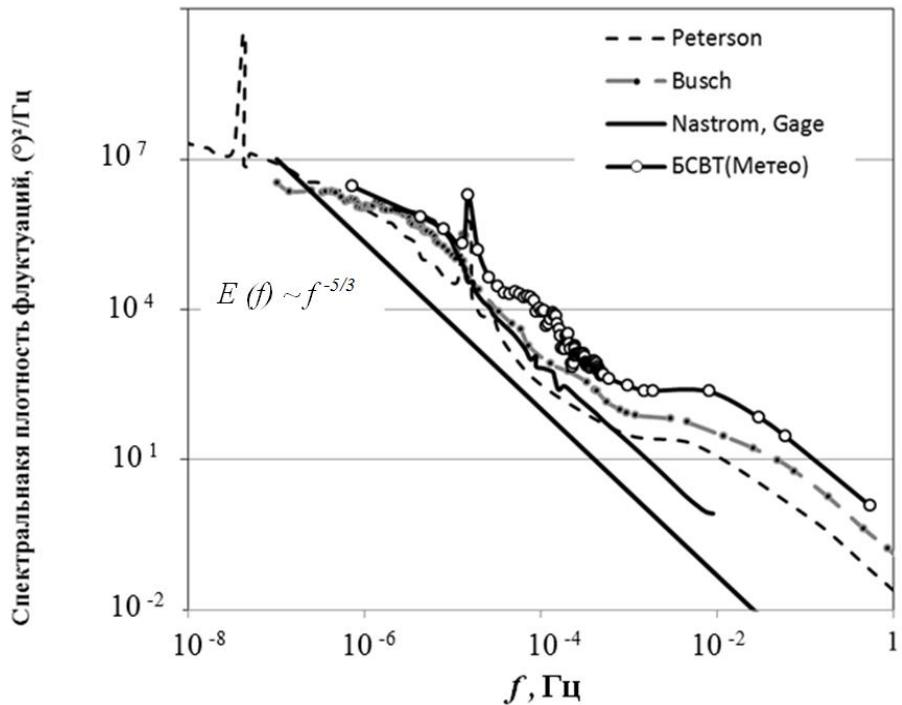


Рис.2 Спектры турбулентных флуктуаций температуры в широком диапазоне частот по данным различных исследований

Жирной непрерывной линией с маркерами круглой формы показан энергетический спектр турбулентных флуктуаций температуры, рассчитанный по данным собственных измерений вблизи колоны Большого солнечного вакуумного телескопа. Измерения флуктуаций температуры и скорости ветра проводились с помощью ультразвуковой метеостанции «Метео-2» на уровне 4 м. Общая продолжительность наблюдений,

выполненных в различное время года, составила около 4 лет. Для сравнения на рис.2 изображены энергетические спектры для пограничного слоя [8] и свободной атмосферы [7].

Анализ представленных фоновых спектров показывает, что атмосферные неоднородности температуры определенным образом структурированы по интенсивности в широком диапазоне частот. В низкочастотной области (с соответствующими масштабами порядка нескольких суток) в атмосферном пограничном слое фоновый спектр флюктуаций температуры отличается от формы, предсказываемой квазигеострофической моделью турбулентности (в которой спектральная плотность флюктуаций  $E_T(f)$  пропорциональна частоте  $f^{-3}$ ) и аппроксимируется зависимостью вида  $E_T(f) \sim f^{-5/3}$ . В то время как спектр для свободной атмосферы в этом диапазоне по данным [7] аппроксимируется зависимостью:  $E_T(f) \sim f^{-3}$ . Аналогичные результаты приведены в диссертации и для флюктуаций скорости ветра.

В высокочастотной части наклон изменяется, и спектральная плотность флюктуаций определяется:  $E_T(f) \sim f^{-5/3}$ . При этом показано, что в переходной области (около  $10^{-5}$  Гц), где зависимость спектральной плотности флюктуаций изменяется от  $f^{-3}$  к  $f^{-5/3}$ , в развитых течениях энергетический спектр может аппроксимироваться суммой  $E_T(f) \sim a_1 f^{-3} + a_2 f^{-5/3}$ , где  $a_1, a_2$  – коэффициенты пропорциональности. При низкой энергии течений, как показывают наши расчеты, выполненные по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis для высоты 5 км, спектры флюктуаций температуры также аппроксимируются зависимостью  $E_T(f) \sim f^{-5/3}$  в широком диапазоне частот.

Для исследования оптических свойств атмосферы интерес представляет наиболее высокочастотный спектральный диапазон. Анализ рис.2 показывает, что в диапазоне адаптации солнечных изображений, в высокочастотной части фонового энергетического спектра, соответствующего атмосферному пограничному слою, образуется «ступенька»: показатель степени в спектральном законе становится больше минус 5/3. Исследования формы спектров в этом частотном диапазоне показывают, что спектральная плотность флюктуаций температуры (а также скорости ветра) зависит от частоты в степени, изменяющейся от минус 5/3 до плюс 2.

Наиболее высокочастотный диапазон (от 100 Гц до 0,033 Гц) был исследован по результатам обработки собственных наблюдений солнечных изображений, полученных с частотой до 200 Гц в прямом фокусе БСВТ. В зависимости от уровня оптической нестабильности земной атмосферы (радиус когерентности изменялся от 2 см до 4,5 см) изображения грануляции и солнечных пятен регистрировались с различным контрастом, резкостью и зашумленностью. Эти характеристики оценивались по специальной программе [6], в которой предусмотрен анализ качества солнечных изображений по контрасту и резкости. Анализ флюктуаций контраста изображений,

оцененного по накопленному архиву изображений, позволил подтвердить, что в частотном диапазоне от 0,8 Гц до 12 Гц спектры с высокой точностью могут быть описаны степенной зависимостью  $E(f) \sim f^{-5/3}$ . В более высокочастотном диапазоне  $f > 12$  Гц спектры становятся положе, интенсивность флюктуаций фактически определяется уровнем шумов.

По результатам исследований второй главы показано, что интенсивность фоновой мелкомасштабной турбулентности в свободной атмосфере и пограничном слое определяется энергией низкочастотных компонент турбулентности и тем, как структурированы атмосферные течения в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. В среднем воздушные течения атмосферного пограничного слоя обладают меньшей кинетической энергией по сравнению с течениями свободной атмосферы. В то же время энергия турбулентности (в том числе флюктуаций показателя преломления) в мелкомасштабном диапазоне спектра, в диапазоне адаптации солнечных изображений, в пограничном слое, как правило, больше энергии турбулентности свободной атмосферы. Прежде всего, этот момент является ключевым для солнечных наблюдений, в процессе которых, наибольший вклад в общую энергию турбулентности атмосферы и в понижение разрешающей способности дает турбулентность пограничного слоя, которая по приведенным оценкам составляет в среднем порядка 30 %.

Во второй половине главы на основании анализа форм фоновых энергетических спектров атмосферной турбулентности в широком диапазоне пространственных и временных масштабов, а также дисперсионных функций развита методика оценки оптической нестабильности земной атмосферы. Обсуждается возможная схема энергетического взаимодействия атмосферных неоднородностей различных частот в широком диапазоне пространственных и временных масштабов и механизмы формирования формы энергетического спектра атмосферных неоднородностей.

Концептуальной основой методики является статистически значимая оценка характеристик температурных флюктуаций в низкочастотном спектральном диапазоне (соответствующем продолжительности естественного синоптического периода) в конкретной точке и дальнейшее определение характеристик ОНЗА *по форме энергетического спектра турбулентности в широком диапазоне частот*. Так, например, в свободной атмосфере спектр турбулентности хорошо аппроксимируется двумя зависимостями:  $E_T(f) \sim f^{-3}$  – в низкочастотной области и  $E_T(f) \sim f^{-5/3}$  – в высокочастотном диапазоне. В этом случае плотность высокочастотных флюктуаций температуры определяется в виде:

$$E_{IT}(f) = E_{LT}(f) \exp(-3(\ln f_t - \ln f_L) - \frac{5}{3}(\ln f_t - \ln f_L)),$$

где  $E_{IT}$  – спектральная плотность энергии флюктуаций температуры в высокочастотном диапазоне,  $E_{LT}$  – спектральная плотность энергии флюктуаций температуры в области низких частот,  $f_L$ ,  $f_t$  – частоты в низкочастотном и высокочастотном

диапазонах соответственно,  $f_t$  – частота перехода ( $f_t \sim 10^{-5} \text{ Гц}$ ). При этом известно, что флуктуации показателя преломления, которые определяют качество изображения, связаны в рамках представлений закона Гладстона-Дейла с флуктуациями плотности воздуха. И в изобарическом приближении, когда флуктуации давления равны нулю, флуктуации показателя преломления могут быть выражены через флуктуации температуры:  $\sigma_n^2 = (AP/\bar{T}^2)^2 \sigma_T^2$ , где  $A = 80 \cdot 10^{-6} \text{ К/гПа}$  – постоянный коэффициент в оптическом диапазоне,  $\sigma_n^2$  – дисперсия флуктуаций показателя преломления,  $\sigma_T^2$  – дисперсия флуктуаций температуры воздуха,  $P$  – атмосферное давление,  $\bar{T}$  – средняя температура воздуха.

Таким образом, аппроксимируя спектр турбулентности в широком диапазоне частот, можно оценить дисперсию  $\sigma_n^2$  и структурную характеристику флуктуаций показателя преломления воздуха  $C_n^2 = (AP/\bar{T}^2)^2 C_T^2$ .

И, как следствие, определить интегральные значения  $\int_{z_1}^{z_2} C_n^2 dz$  в «оптически активных слоях» атмосферы, радиус атмосферной когерентности

$$r_0 = \left( 0.423k^2 \sec \alpha \int_0^H C_n^2(z) dz \right)^{-3/5}, \quad \text{изопланатический угол}$$

$$\theta_0 = \left( 2.91k^2 \sec^3 \alpha \int_0^H C_n^2(z) z^{5/3} dz \right)^{-3/5} \quad \text{и время когерентности } \tau_0 = 0.314r_0/V_0. \quad \text{В}$$

представленных формулах используются следующие обозначения:  $C_T^2$  – структурная характеристика флуктуаций температуры,  $z$  – высота,  $H$  – высота «оптически активной» атмосферы,  $k$  – волновое число,  $\alpha$  – зенитный угол и

$$V_0 = \left( \int_0^H C_n^2(z) V^{5/3}(z) dz / \int_0^H C_n^2(z) dz \right)^{3/5}.$$

Методика оценки ОНЗА, построенная на этой основе, дает возможность оценить качество изображения для большой территории по осредненным метеорологическим радиозондовым данным, используя длительные ряды наблюдений. В то время как наблюдения оптических и структурных характеристик турбулентности в основном имеют эпизодический характер и преимущественно выполнены в пограничном слое атмосферы, толщина которого варьирует от нескольких десятков м до нескольких сотен м.

В конце второй главы показаны результаты верификации методики оценки ОНЗА. Отклонения средних экспериментальных значений качества изображения («seeing»), измеренных с помощью дифференциального монитора дрожания изображения, от средних значений, оцененных по спектральной методике не превышают 20 процентов.

**В третьей главе** выполнено исследование пространственно-временной структуры оптической нестабильности земной атмосферы по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis, накопленных за длительный период наблюдений.

Используя предложенную методику, основанную на учёте спектральных особенностей атмосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов, по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis оценено пространственное распределение качества изображения по территории земного шара, которое характеризуется радиусом атмосферной когерентности за период с 1981 по 2010 г. (рис.3). Значения радиуса когерентности атмосферы показаны в см для длины световой волны 0,5 мкм. При этом форма спектра задавалась следующим образом: в низкочастотном диапазоне  $E_T(f) \sim f^{-3}$ , в высокочастотном диапазоне  $E_T(f) \sim f^{-5/3}$ .

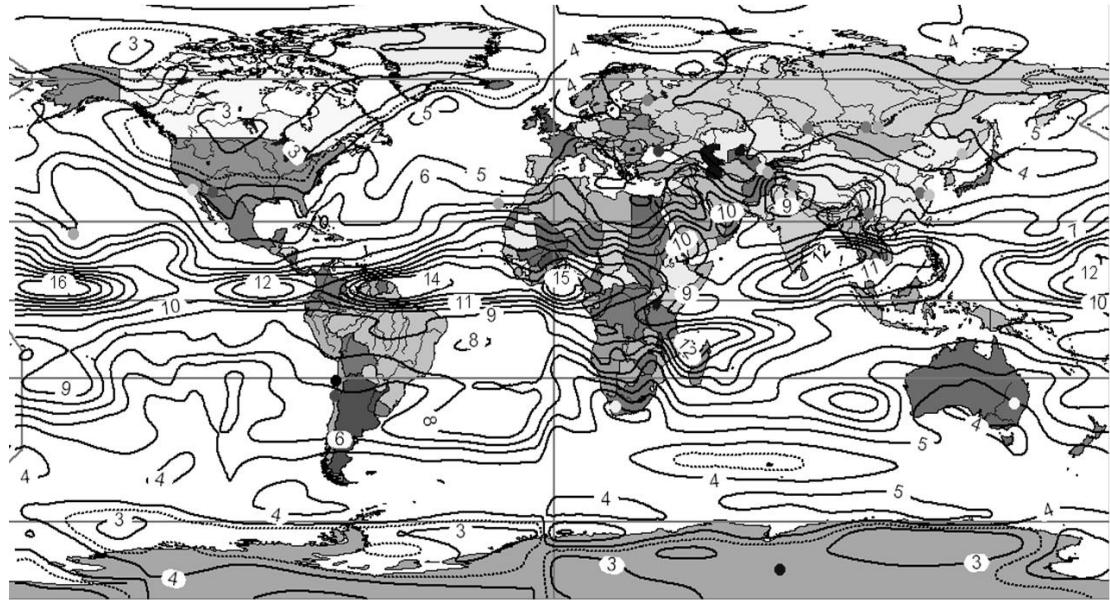


Рис.3. Распределение средних фоновых значений радиуса когерентности атмосферы

Полученные оценки характеризуют некоторую среднюю фоновую величину радиуса атмосферной когерентности. В то время как в процессе наблюдений, особенно в дневное время, радиус когерентности испытывает быстрые короткопериодные флуктуации. При этом замечено, что степень оптической нестабильности (а значит и атмосферного углового разрешения) существенно изменяется в течение года и, прежде всего, между зимой и летом.

Поскольку при проектировании классической или мультиспиральной адаптивной системы необходимо знать распределение интенсивности турбулентности по лучу зрения, было выполнено исследование оптической нестабильности для отдельных высотных уровней атмосферы. По результатам исследований оптической нестабильности земной атмосферы с учетом повторяемости количества общей облачности по данным длительных наблюдений, выявлены и рекомендуются новые перспективные астропункты с высокими астроклиматическими показателями, такие как: отдельные изолированные вершины северной части Мадагаскара, южной части Аравийского полуострова; для территории России – отдельные изолированные вершины Алданского нагорья и юга Читинской области.

**В четвертой главе** показаны результаты расчетов и экспериментальных наблюдений турбулентных и оптических характеристик атмосферы в местах расположения Саянской солнечной обсерватории и Байкальской астрофизической обсерватории. Исследования проведены по данным собственных измерений, выполненных с помощью акустического метеорологического комплекса «Метео-2», датчика Брандта, а также с помощью датчика волнового фронта Шака-Гартмана адаптивной системы БСВТ. Выполненные оценки по спектральной методике позволили определить форму вертикальных профилей структурной характеристики флюктуаций показателя преломления воздуха для Саянской солнечной обсерватории (ССО) и Байкальской астрофизической обсерватории (БАО). На рис. 4 показан средний профиль вертикальных изменений структурной характеристики флюктуаций показателя преломления воздуха  $C_n^2(z)$  в утренние и полуденные часы для ССО.

Анализ полученных вертикальных профилей позволяет говорить о двух наиболее турбулизированных слоях – о нижнем слое, соответствующим высоте расположения обсерватории (2 км) и слое, располагающимся на высоте 10 км над уровнем обсерватории. Средние фоновые значения радиуса атмосферной когерентности в месте расположения ССО – около 4,5 см (2,2 угл.сек) в полуденные часы, и 6,3 см (1,6 угл.сек) – в утренние. В месте расположения БАО средние фоновые значения радиуса атмосферной когерентности незначительно отличаются от приведенных: 4,8 см – в полуденные часы, и 6,6 см – в утренние.

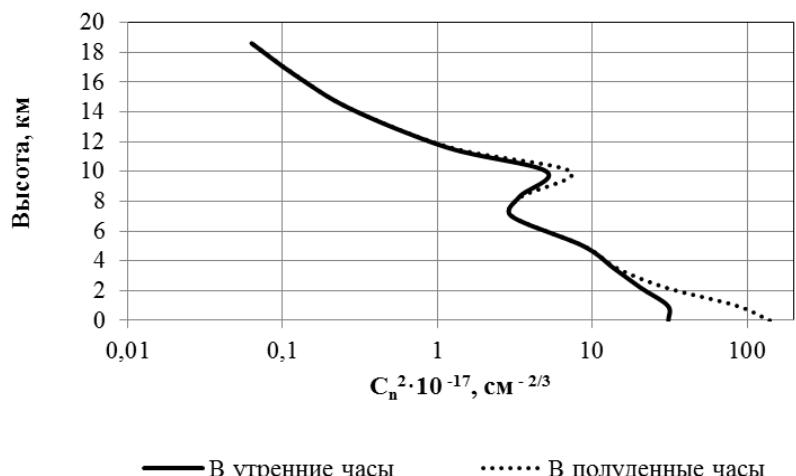


Рис.4 Средние вертикальные профили структурной характеристики флюктуаций показателя преломления воздуха в месте расположения ССО по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis за период с 1984 по 2014 г.

Оцененные по спектральной методике значения структурной характеристики показателя преломления воздуха и радиуса атмосферной когерентности близки по величине к экспериментальным результатам (рис.4,5).

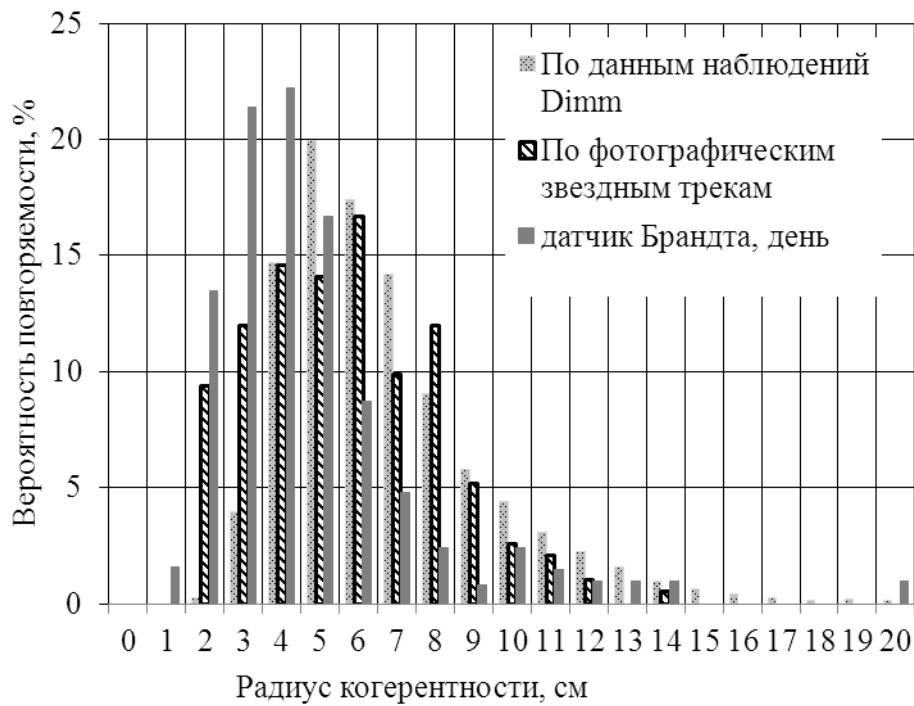


Рис. 5 Распределения плотности вероятности повторяемости значений радиуса когерентности в месте расположения ССО

На рисунке 5 показаны распределения плотности вероятности повторяемости значений радиуса когерентности в месте расположения ССО по результатам измерений, выполненных с помощью фотоэлектрического датчика Брандта, дифференциального датчика дрожания изображения (по измерениям Еселеевича М.В.) и по фотографическим звездным трекам (по измерениям Ковадло П.Г.). Так, результаты продолжительных собственных наблюдений дрожания края солнечного изображения, выполненных с помощью фотоэлектрического датчика Брандта, установленного в оптической схеме Автоматизированного солнечного телескопа, показали, что среднее значение радиуса когерентности в дневное время в месте расположения ССО составляет 4,5 см, среднее квадратическое отклонение  $\pm 3,9$  см. В ночное время по результатам обработки наблюдений, выполненных с помощью дифференциального монитора дрожания изображения (Еселеевич М.В.), а также звездных треков, показано, что среднее значение радиуса когерентности составляет около 6,3 см, при этом среднее квадратическое отклонение радиуса атмосферной когерентности  $\pm 3,2$  см.

Также интерес представляет повторяемость высокого качества изображения. Анализ рис.6 показывает, что высокое качество изображения ( $r_0 \geq 12$  см) в пункте расположения ССО наблюдается в 4 % случаев в ночное время и в 3% – в дневное. Учитывая оценки продолжительности солнечного сияния (2299 ч), возможное наблюдательное время при  $r_0 \geq 12$  см составит около 70 ч в год.

Собственные экспериментальные синхронные измерения турбулентных характеристик в месте расположения БАО, выполненные с помощью акустического комплекса «Метео-2» и aberrаций волнового

фрона, выполненные с помощью датчика Шака-Гартмана адаптивной оптической системы Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) (системы АО «Ангара» разработки ИАО СО РАН) позволили оценить значения радиуса когерентности в данном пункте. Средние фоновые значения радиуса атмосферной когерентности в месте расположения БАО составляют около 4,8 см в дневное время и 6,6 см – в утренние часы.

Кроме этого, было проведено сравнение полученных значений радиуса когерентности с результатами расчетов для ССО и других обсерваторий, выполненных по данным приложений к бюллетеню «Солнечные данные», «Магнитные поля солнечных пятен». В приложениях опубликованы детальные карты магнитных полей солнечных пятен, результаты наблюдений дрожания и качества изображения (в пятибальной шкале). На рис. 6 показаны вычисленные значения радиуса когерентности для каждого месяца для Крымской астрофизической обсерватории (КрАО), Главной астрономической обсерватории (ГАО), Горной астрономической станции (ГАС), Уссурийской астрономической станции Дальневосточного филиала СО АН СССР (ДС) и Саянской солнечной обсерватории (ССО).

Средние значения радиуса когерентности для представленных обсерваторий изменяются от 4,4 (ДС) до 5,7 см (ГАС). Полученные результаты позволяют оценить астроклиматические условия и оптимальные параметры систем адаптивной оптики для разных телескопов. При этом достоинство спектрального подхода заключается в том, что для получения высотных профилей структурной характеристики флуктуаций показателя преломления могут быть использованы данные радиозондовых наблюдений температуры в конкретном пункте, полученные для конкретного высотного уровня атмосферы, а не феноменологические модели, являющиеся, как правило, результатом осреднения по большой территории (например, 1) Хавнагель и Стенли, 2) Гурвич) [2].

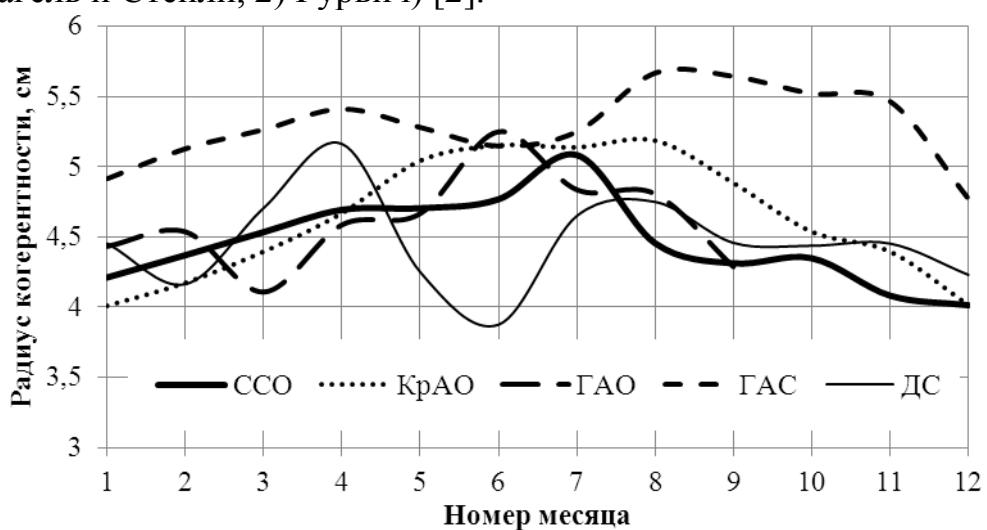


Рис.6 Средние значения радиуса когерентности для разных обсерваторий

## **В заключении сформулированы основные результаты работы**

В работе обсуждается проблема повышения пространственного разрешения солнечных изображений, получаемых с помощью оптических телескопов наземного базирования. При солнечных наблюдениях разрешение таких телескопов и эффективность работы адаптивных систем коррекции изображений ограничиваются оптической нестабильностью, вызванной турбулентностью атмосферных течений. На основе исследований энергетических спектров турбулентности в широком диапазоне частот разработана методика оценки характеристик турбулентности и оптической нестабильности земной атмосферы.

По известной форме фонового энергетического спектра атмосферной турбулентности в широком диапазоне частот и характеристикам колебаний атмосферных неоднородностей в заданном спектральном интервале возможно оценивать параметры турбулентности в любом другом произвольном интервале, в том числе, и высокочастотном. Методика оценки ОНЗА, построенная на этой основе, дает возможность с известной точностью получать статистически обеспеченные оценки качества изображения для большой территории по осредненным метеорологическим радиозондовым данным. Полученная информация об фоновых значениях радиуса атмосферной когерентности, о высотах и интенсивности наиболее развитых турбулентных слоев в конкретном пункте может служить основой для разработки систем АО и перестройки (подстройки) уже существующих систем под реальные атмосферные условия. Знание высот наиболее турбулизированных слоев также является необходимым для работы мультиспряженных систем АО, применяемых для исправлений искажений волнового фронта в большем поле зрения.

По результатам экспериментальных наблюдений и расчетов оптических и структурных характеристик в месте расположения Байкальской астрофизической обсерватории и Саянской солнечной обсерватории определены астроклиматические условия, получены модели вертикальных изменений структурной характеристики показателя преломления воздуха в оптически активной атмосфере и выявлены высоты сопряжения для адаптивных оптических систем. Результаты астроклиматических исследований в месте расположения Саянской солнечной обсерватории использованы в техническом задании мегапроекта крупного солнечного телескопа (КСТ). Аналогичные результаты оценки структурных характеристик флюктуаций показателя преломления использованы для расчета оптимальных параметров адаптивной оптической системы Большого солнечного вакуумного телескопа.

Выполненные количественные исследования структуры оптической нестабильности земной атмосферы позволили с учетом повторяемости количества общей облачности выявить и рекомендовать новые перспективные астропункты с высоким качеством изображения: отдельные изолированные вершины северной части Мадагаскара, Новой Зеландии,

южной части Аравийского полуострова; для территории России - отдельные изолированные вершины Алданского нагорья и юга Читинской области.

### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Абдусаматов Х.И. Методы и результаты исследования солнечных пятен и окружающей фотосферы с высоким разрешением: диссертация на соискание ученой степени д.ф-м.н. // Санкт-Петербург, 1997. – 410 с.
2. Гурвич А.С Лазерное излучение в турбулентной атмосфере / А.С. Гурвич, А.И. Кон, В.Л.Миронов, С.С. Хмельцов. – М.: Наука, 1976. – 277 с.
3. Ковадло П.Г. Результаты астроклиматических исследований по наблюдениям Солнца и оптическая нестабильность земной атмосферы: диссертация на соискание ученой степени д.ф-м.н. // Иркутск, 2001. – 280 с.
4. Шиховцев А.Ю. Об астроклиматических условиях в горных регионах юга Восточной Сибири / А.Ю.Шиховцев, П.Г.Ковадло, Е.А.Копылов // Байкальская школа по фундаментальной физике. Иркутск, 2015. – С.313–315.
5. Carrasco E. High altitude wind velocity at San Pedro Martir and Mauna Kea / E. Carrasco, M. Sarazin // RevMexAA. – 2003. – P. 103 – 106.
6. Lukin V.P. Image quality analyzer / Lukin V.P., Botugina N.N., Antoshkin L.V., Konyaev P.A. // Proc. SPIE. – 2013. – V.8447. – doi: 10.1117/12.925595.
7. Nastrom G.D. A climatology of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft / G.D. Nastrom, K.S. Gage // J. Atmos. Sci. – 1985. – V. 42. – P. 950 – 960.
8. Petersen E.L. On the kinetic energy spectrum of atmospheric motions in the planetary boundary layer / E.L. Petersen // RisØ Report № 285. – 1975. – P. 1 – 103.
9. Sarazin M. The statistics of isoplanatic angle and adaptive optics time constant derived from DIMM data / M. Sarazin, A.Tokovinin // Beyond Conventional Adaptive Optics. A conference devoted to the development of adaptive optics for extremely large telescopes. Venice, Italy may 7 – 10. – 2001. – P. 321 – 328.
10. Van der Hoven I. Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour / I. Van der Hoven // J. of meteorology. – 1957. – V. 14. – P. 160 – 164.
11. Vinnichenko N.K. The kinetic energy spectrum in the free atmosphere – 1 second to 5 years / N.K. Vinnichenko //Tellus XXII. – 1970. – V.2. – P. 158 – 166.

### Основные публикации автора

По теме диссертации автором опубликовано 20 работ.

**Публикации в российских рецензируемых научных журналах «Перечня ведущих периодических изданий ВАК» и в изданиях, входящих в перечень Web of Sciences, рекомендованных для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук:**

1. Н.Н. Ботыгина, П. Г. Ковадло, Е.А.Копылов, В.П. Лукин, М.В. Туев, А.Ю.

Шиховцев Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа из оптических и метеорологических измерений // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26. – № 11. – С. 942 – 947.

2. P.G. Kovadlo, A.Yu. Shikhovtsev, O.S. Kochetkova The investigation of spectrum shape of atmospheric inhomogeneities over an extended dynamic range // Proc. SPIE 8696, Eighteenth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 869606 (November 27, 2012); doi:10.1117/12.200957. – 2012.
3. Shikhovtsev A. Yu., Kovadlo P.G. Optical turbulence and different parameters of airflow // SPIE Proceedings 20<sup>th</sup> International Symposium on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics. – 2014. V. 9292. – doi: 10.1117/12.2074609
4. Shikhovtsev A. Yu., Kovadlo P.G. Calculation of the profile of turbulent inhomogeneities of the air refractive index // SPIE Proceedings 20<sup>th</sup> International Symposium on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics. – 2014. V. 9292. – doi: 10.1117/12.2075062.
5. Kopylov E.A., Bolbasova L.A., Goleneva N.V., Lavrinov V.V., Shikhovtsev A. Yu. Investigations of parameters of image quality for adaptive optical systems of BSVT // SPIE Proceedings 21<sup>st</sup> International Symposium on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics. – 2015. V. 9680. – doi: 10.1117/12.2205600.
6. Botygina N.N., Kopylov E.A., Lukin V.P., Kovadlo P.G., Shikhovtsev A. Yu. Variability of the atmospheric turbulence in the region lake of Baykal // SPIE Proceedings 21<sup>st</sup> International Symposium on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics. – 2015. V. 9680. – doi: 10.1117/12.2205670.
7. Kovadlo P.G., Shikhovtsev A. Yu. The study of turbulence and optical instability in stably stratified Earth's atmosphere // SPIE Proceedings 21<sup>st</sup> International Symposium on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics. – 2015. V. 9680. – doi: 10.1117/12.2205997.

### Прочие публикации

1. Ковадло П. Г., Кочеткова О. С., Шиховцев А. Ю. Исследование крупномасштабных астроклиматических характеристик // Изв. Иркут.гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2010. – Т.3, №2 – С.88 – 96.
2. П.Г. Ковадло, А.Ю.Шиховцев, О.С. Кочеткова Методика оценки оптической нестабильности земной атмосферы на основе численного анализа сетевых метеорологических данных // Изв. Иркут.гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2012 . С.139 – 149.
3. Ковадло П. Г., Шиховцев А. Ю. Энергетическая структура оптической атмосферной турбулентности при различных параметрах воздушного потока // Изв. Иркут.гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2014. Т.8.– С.42 – 55.
4. Ковадло П. Г., Шиховцев А. Ю. Исследование оптической турбулентности в условиях сильно устойчивой термической стратификации атмосферы // Изв. Иркут.гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2015. Т.12.– С.23 – 34.
5. Копылов Е.А., Туев М.В., Шиховцев А.Ю. Исследование оптических и структурных метеорологических качества изображения на площадке

- Большого солнечного вакуумного телескопа Байкальской астрофизической обсерватории // Физика. – 2013. – Т.56, № 8/3 – С.311 – 314.
6. Ковадло П. Г., Найденов П. А., Шиховцев А. Ю. Результаты структурных измерений параметров приземного слоя атмосферы на площадке Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН // Изв. Ирк. гос. ун-та. – 2009. – Т.2, №2 – С.105 – 116.
7. Ковадло П. Г., Шиховцев А. Ю., Кочеткова О. С. Методика исследования оптической нестабильности земной атмосферы на основе численного анализа сетевых метеорологических данных // Избранные проблемы астрономии: Материалы ПВсеросс. астрон. конф. «Небо и Земля», посв. 80-летию астрон. Обсерватории ИГУ.г. Иркутск, 22-24 ноября 2011 г. Иркутск: Изд-во ИГУ. 2011. – С. 265 – 272.
8. Ковадло П. Г., Кочеткова О. С., Шиховцев А. Ю. Оптическая нестабильность земной атмосферы южной части Восточной Сибири // Солнечно-земная физика. – 2011. – В.17 – С.80 – 85.
9. Ковадло П. Г., Шиховцев А. Ю., Кочеткова О. С. Исследование крупномасштабных и структурных характеристик атмосферной турбулентности // Байкальская школа по фундаментальной физике. XII Конференция молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом". г. Иркутск, 19-24 сентября 2011 г.: тез.докл. Иркутск, 2011. С.97-98.
10. Ковадло П.Г., Шиховцев А. Ю., Кочеткова О.С Исследование структуры атмосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов // Байкальская школа по фундаментальной физике. "Взаимодействие полей и излучения с веществом".г. Иркутск. – 2013. – С. 348 – 350.
11. Ботыгина Н.Н., Ковадло П. Г., Копылов Е. А., Лукин В.П., Туев М.В., Шиховцев А.Ю. Оценка радиуса Фрида из оптических и метеорологических измерений в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа // Байкальская школа по фундаментальной физике. "Взаимодействие полей и излучения с веществом".г. Иркутск, 2013. – С. 303 – 305.
12. Ковадло П.Г., Кочеткова О.С., Шиховцев А.Ю., Язев С.А. Астроклимат Сибири // Труды Всероссийской конференции по солнечно-земной физики, посвященной 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В.Е. Степанова «Физика Солнца и околоземного космического пространства» 16 – 21 сентября 2013 г. , 2013, С. 243 – 248.
13. Шиховцев А.Ю. Об астроклиматических условиях в горных регионах юга Восточной Сибири / А.Ю.Шиховцев, П.Г.Ковадло, Е.А.Копылов // Байкальская школа по фундаментальной физике. Иркутск, 2015. – С.313 – 315.