

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию **Шиховцева Артема Юрьевича**
"Исследование оптической неустойчивости земной атмосферы
и условий коррекции солнечных изображений",
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.03 – физика Солнца

Дата: 28 марта 2016 г.

Актуальность

Астрономические наблюдения являются источником первичной информации в современной физике Солнца, задачи которой требуют пространственного разрешения в изображении в десятые и сотые доли угловой секунды. Поэтому повышение информативности астрономических наземных телескопов является важной и *актуальной* проблемой физики Солнца.

В условиях ясной и незамутненной атмосферы, когда обычно и проводятся наблюдения, разрешающая способность солнечных телескопов определяется, в первую очередь, атмосферной турбулентностью. Турбулентность снижает качество астрономических изображений, вызывая дрожание, мерцание и разрушение структуры изображений. В астрономической практике пространственно-временные изменения оптических свойств турбулентности называются оптической неустойчивостью земной атмосферы (ОНЗА).

Ясно, что для повышения качества изображений необходима минимизация турбулентных искажений. Это является *актуальной* проблемой. Она может быть решена путем изучения ОНЗА с последующим выбором оптимальных мест размещения солнечных телескопов, а также применением адаптивной оптики, включая выбор наилучших условий для адаптации.

Диссертационная работа Шиховцева А.Ю. и посвящена экспериментальным и теоретическим (численным) исследованиям оптической неустойчивости земной атмосферы и исследованиям условий коррекции солнечных изображений.

Выполненное в диссертации исследование формы и деформаций спектра атмосферной турбулентности в широком диапазоне частот для различных атмосферных условий представляет собой важную и *актуальную* задачу не только для прогноза характеристик астроклимата и повышения качества изображений, но и для теории турбулентности. На основе полученной информации о форме спектра, с использованием доступных глобальных архивов данных о крупномасштабных энергонесущих атмосферных неоднородностях (накопленных за длительные промежутки времени, в пограничном слое и в свободной атмосфере), в работе развита методика спектральной оценки мелкомасштабных турбулентных характеристик, характеризующих астроклимат места и территории в целом. Для конкретных мест размещения солнечных телескопов (Байкальская астрофизическая и Саянская солнечная обсерватории) выполнены исследования структурных особенностей и временных вариаций турбулентности (включая анализ крупно- и мелкомасштабных неоднородностей), исследованы интегральные оптические характеристики турбулентности и выяснены оптимальные условия для коррекции солнечных изображений.

В настоящее время *актуальность* исследований, выполненных в диссертации Шиховцева А.Ю., повышается в связи с появлением современных дорогостоящих крупных наземных телескопов и использованием в них сложных и дорогостоящих адаптивных оптических систем.

Таким образом, проведенные в диссертационной работе исследования являются *актуальными*. Полученная в работе информация о параметрах оптической неустойчивости земной атмосферы позволяет выявить пункты с высоким качеством изображения и выбрать способы коррекции солнечных изображений.

Цель исследований

Диссертационная работа имеет целью исследование оптической нестабильности земной атмосферы в широком диапазоне пространственных и временных масштабов турбулентности, а также выяснение оптимальных условий для адаптивной коррекции солнечных изображений.

Содержание диссертационной работы

Диссертация Шиховцева А.Ю. общим объемом в 171 страницу состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 90 рисунков и пять приложений с прикладными картами по результатам наблюдений дрожания и качества изображения. Список цитируемой научной литературы содержит 172 наименований.

Кратко остановимся на наиболее существенных моментах диссертации.

Во введении приведены сведения о поставленной цели работы, определяются задачи проводимых исследований, кратко говорится об экспериментальных и теоретических методах исследования свойств турбулентной атмосферы, формулируются защищаемые положения, освещены научная новизна, достоверность результатов, научная и практическая значимость диссертации, апробация работы, а также личный вклад автора.

Первая глава является вводной к диссертации, в ней описываются используемые в дальнейшем теоретические положения и термины. В главе выполнен обзор основных параметров астрономических телескопов, описывающих качество, дрожание и искажения структуры получаемых изображений, такие как функция размытия точки, число Штреля, оптическая передаточная функция, разрешение телескопа и др. Приводятся сведения по теории турбулентности (включая, колмогоровскую турбулентность) и распространения волн в турбулентной атмосфере, теории формирования оптических изображений, описан процесс смены режима турбулентных течений. Вторая группа рассматриваемых в главе параметров характеризует атмосферную турбулентность и ее влияние на работу телескопов. Это основные параметры ОНЗА, оцениваемые по развитой во второй главе методике. Методика позволяет оценивать значение структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха (интенсивности турбулентности) в оптически активном слое атмосферы, интегральное значение интенсивности турбулентности, радиус когерентности, изопланатический угол, время когерентности τ_0 и др. В последнем параграфе главы рассматриваются параметры адаптивных оптических систем в турбулентной атмосфере.

Вторая глава по объему (69 стр.) является наибольшей в диссертации. Она начинается с параграфа, в котором предпринят исторический экскурс по развитию теории турбулентности вплоть до основных современных моделей турбулентности. Далее, с целью получения связей между параметрами турбулентной атмосферы в разных частотных (или пространственных) диапазонах и разных высотных слоях атмосферы, оптическая нестабильность атмосферы исследуется по флуктуациям скорости ветра и температуры. Также исследованы корреляционные связи между различными параметрами ОНЗА. Механизм передачи энергии по спектру и взаимодействие турбулентных вихрей различного масштаба исследован исходя из вида рассчитанных структурных функций скорости ветра третьего порядка. В главе с использованием обширных экспериментальных данных и собственных измерений предпринято основательное исследование энергетических спектров турбулентных флуктуаций температуры и скорости ветра в широком диапазоне частот для различных атмосферных условий. В частности показано, что в пограничном слое атмосферы при небольших скоростях ветра энергетические спектры в высокочастотной части пропорциональны частоте в степени, меняющейся от минус $5/3$ до плюс 2, и в низкочастотной области не совпадают с квазигеострофической моделью турбулентности ($E(f) \sim f^{-3}$) на масштабах порядка нескольких суток. Зависимость $E(f) \sim f^{-3}$ проявляется только на высотах выше пограничного слоя трения атмосферы, при этом микрометеорологический максимум в спектре проявляется в 30 % имеющихся данных. В конце главы, приведенные в ней данные о спектральных

особенностях атмосферной турбулентности, использованы для разработки методики оценки характеристик оптической нестабильности земной атмосферы по архивам данных радиозондирования. В методике используются установленные в главе сведения о форме энергетических спектров в широком диапазоне частот, что позволяет по архивным данным о крупномасштабной турбулентности аппроксимировать энергетический спектр мелкомасштабной. Методика позволяет численно оценить интенсивность мелкомасштабной турбулентности, наиболее (в диапазоне частот оптической адаптации) влияющей на наблюдаемые изображения, и другие характеристики ОНЗА с хорошей точностью (20 % для параметра «видение»). Методика оценки ОНЗА, построенная на этой основе, дает возможность с известной точностью получать статистически обеспеченные оценки качества изображений для большой территории. Полученная информация о фоновых значениях радиуса атмосферной когерентности, о высотах и интенсивности наиболее развитых турбулентных слоев в конкретном пункте может служить основой для разработки систем адаптивной оптики и перестройки (подстройки) уже существующих систем под реальные атмосферные условия.

В третьей главе приведены результаты проведенных автором исследований распределения оптической нестабильности земной атмосферы по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis. Применяя предложенную во второй главе методику, оценено пространственное распределение качества изображений по территории России (Урала, Сибири, Дальнего Востока), горных районов Таджикистана, а также всего земного шара. Отмечено, что степень оптической нестабильности и угловое разрешение существенно меняются от зимы к лету. 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. Например, 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 приведены результаты собственных экспериментальных измерений и расчетов турбулентных и оптических характеристик атмосферы в местах расположения Саянской солнечной обсерватории (ССО) и Байкальской астрофизической обсерватории (БАО). Исследования проведены по данным измерений, выполненных с помощью акустического метеорологического комплекса «Метео-2», датчика Брандта, а также с помощью датчика волнового фронта Шака-Гартмана адаптивной системы Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ).

Выполненные оценки по спектральной методике позволили определить астроклиматические условия и форму высотных профилей структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха для обсерваторий. Анализ полученных в ССО профилей выявил два наиболее турбулизованных слоя – нижний слой, соответствующий высоте расположения обсерватории (1 км) и слой, располагающийся на высоте 10 км над уровнем обсерватории. Данные слои необходимо учитывать при коррекции турбулентных искажений волнового фронта несколькими адаптивными зеркалами, сопряженными с различными по высоте наиболее оптически активными слоями атмосферы (для расширения корректируемого поля зрения солнечного телескопа). По результатам экспериментальных и численных исследований, например, установлено, что в месте расположения ССО среднее качество изображения (определяемое радиусом когерентности) для длины волны 0.5 мкм в утренние часы составляет 1.6 угловой секунды, в дневное время – 2.2 угловой секунды. Произведенные по спектральной методике оценки значений интенсивности турбулентности и радиуса когерентности оказались близки к экспериментальным результатам.

Кроме этого, проведено сравнение полученных значений радиуса когерентности с результатами расчетов для ряда известных обсерваторий (Крымская астрофизическая, Главная астрономическая, Саянская солнечная обсерватории; Горная и Уссурийская астрономические станции). Средние значения радиуса когерентности для представленных обсерваторий

изменяются от 4,4 до 5,7 см. Полученные результаты позволяют оценить астроклиматические условия и оптимальные параметры систем адаптивной оптики для разных обсерваторий.

Апробация работы

Содержание диссертации соответствует опубликованным материалам по теме диссертации. Основные результаты диссертации докладывались на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах с 2009 по 2015 годы, опубликованы автором в 20 печатных работах, в том числе 8 статей опубликованы в рецензируемых российских и международных изданиях из перечня ВАК.

Научная новизна полученных результатов. Научная значимость

К наиболее *важным новым научным результатам* можно отнести следующие:

- Разработана новая методика расчета характеристик оптической нестабильности земной атмосферы, основанная на спектральных особенностях турбулентности в широком диапазоне масштабов. В частности, методика позволяет численно оценивать астроклиматические характеристики места и необходимые параметры для адаптивных оптических систем наземных крупных солнечных телескопов (в первую очередь, в местах расположения Саянской солнечной и Байкальской астрофизической обсерваторий).

- Выполнено исследование формы фоновых энергетических спектров атмосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов в зависимости от параметров крупномасштабных атмосферных неоднородностей, в том числе в интервале оптической нестабильности земной атмосферы с масштабами, сопоставимыми с диаметром апертуры оптических инструментов. Установлено, что в высокочастотной части фонового энергетического спектра турбулентности, в диапазоне адаптации солнечных изображений, в атмосферном пограничном слое образуется «ступенька», где спектральная плотность пульсаций зависит от частоты в степени, изменяющейся от минус 5/3 до плюс 2.

- Впервые получено пространственное распределение по территории земного шара радиуса атмосферной когерентности, определяющего разрешающую способность наземных телескопов, на основе спектральных особенностей турбулентности в широком диапазоне масштабов.

Указанные новые научные результаты имеют *научную значимость* для повышения качества солнечных изображений, прогноза характеристик астроклимата, для теории турбулентности, оптики и физики атмосферы.

Практическая значимость

Большинство исследований, выполненных в диссертационной работе, имеют *практическую направленность и значимость*.

Оценка качества изображения в конкретном пункте требует организации и проведения многолетних прямых оптических наблюдений. Но проводить прямые длительные широкомасштабные (по площади) астроклиматические исследования задача затратная и трудоемкая. Поэтому целесообразно предварительно получить астроклиматическую оценку перспективности района на основе численного анализа накопленных сетевых метеорологических данных, используя предлагаемую методику расчета средних структурных характеристик показателя преломления воздуха.

Полученные результаты и разработанная в диссертации методика оценки фоновых характеристик ОНЗА позволяют оценить астроклиматические условия при выборе мест установки крупных телескопов, качество изображений и оптимальные параметры систем адаптивной оптики для них. Это особенно важно в связи с высокой стоимостью и уникальностью современных астрономических инструментов. При этом достоинство спектрального подхода заключается в том, что для получения высотных профилей

интенсивности турбулентности могут быть использованы данные радиозондовых наблюдений температуры в конкретном пункте, полученные для конкретного высотного уровня атмосферы, а не феноменологические модели, являющиеся обычно результатом осреднения по большой территории.

Результаты астроклиматических исследований в месте расположения Саянской солнечной обсерватории использованы в техническом задании крупного солнечного телескопа (КСТ) мегапроекта «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН». Аналогичные результаты для структурных характеристик пульсаций показателя преломления использованы для расчета оптимальных параметров адаптивной оптической системы БСВТ.

Использование результатов

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы в научных учреждениях РАН, занимающихся исследованиями по оптике атмосферы, физике атмосферы и океана, астрономии. Результаты могут быть также использованы в научно-прикладных учреждениях РФ, занимающихся проектированием и созданием соответствующей техники.

Они могут быть использованы, например, в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, в Институте солнечно-земной физики СО РАН, в Институте физики атмосферы РАН, в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, в Институте водных и экологических проблем СО РАН, в Специальной астрофизической обсерватории РАН, в Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН, в Институте астрономии РАН, в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга, в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, «НПО Астрофизика» и др.

Достоверность

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы подтверждается использованием в экспериментальных исследованиях известных средств и схем проведения исследований, применением для анализа экспериментальных данных обоснованных методов, адекватностью полученных в работе результатов и их совпадением с более ранними результатами других исследований в подобных условиях наблюдений, согласием с результатами теоретического анализа. Достоверность подтверждается также значительным количеством накопленных и использованных в диссертации экспериментальных данных, полученных в различных географических и метеорологических условиях.

Личный вклад автора

Автор находится в курсе современного состояния и тенденций развития теории турбулентности и физики атмосферы, принимал участие в постановке и реализации оптических и метеорологических экспериментов, обработке результатов, анализе данных.

Автореферат

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Достоинства работы

К достоинствам работы можно отнести большое количество фактического материала, сведенного вместе в диссертации и переработанного в связи с задачами работы. Практически на каждой странице приводятся графики и рисунки (90 рисунков в диссертации). Диссертация характеризуется внутренним единством структуры, через весь текст диссертации прослеживается мотивация проводимых исследований, постоянное обращение автора к цели работы, ясное понимание рассматриваемых задач. Автор использовал в диссертации множество различных подходов и методов к проблеме улучшения оптических изображений, находится в курсе современного состояния и тенденций развития теории турбулентности и физики атмосферы.

Следует отметить, что данная работа относится как к экспериментальным, так и к теоретическим исследованиям. Автор корректно использует принятые методологические подходы и методики при проведении теоретического анализа и экспериментальных исследований, обосновании полученных результатов, выводов и рекомендаций. В целом автором проделана огромная работа по исследованию астроклимата и его региональной изменчивости. Работа интересная, написана качественно, наглядно оформлена.

Недостатки работы

Представленная диссертационная работа не свободна от недостатков:

1. Нет оценок влияния ширины зоны перегиба спектров от наклона «-3» к «-5/3». В тексте диссертации указан лишь приблизительный диапазон граничных масштабов этой зоны: от 800 км до 600 км (стр. 79, 95). Следовало бы указать оценки погрешности, возникающей от того или иного выбора частоты перехода внутри этой зоны.

2. Во втором защищаемом положении говорится: «Установлено, что в высокочастотной части фонового энергетического спектра, соответствующего атмосферному пограничному слою, в диапазоне адаптации солнечных изображений, образуется ступенька, где спектральная плотность пульсаций зависит от частоты в степени, изменяющейся от минус $5/3$ до плюс 2». Это защищаемое положение сформулировано так, что можно предположить, что ступенька возникает в любом атмосферном пограничном слое в переходном мезометеорологическом интервале. Известные экспериментальные данные, однако, показывают, что указанная ступенька может как появляться, так и нет. По-видимому, это зависит от типа подстилающей поверхности и степени ее нагрева. Поэтому во втором защищаемом положении следовало бы уточнить, что понимается под «диапазоном адаптации солнечных изображений».

3. В тексте диссертации нет нумерации на наиболее важные из приводимых формул, они не выделены. В итоге некоторые формулы повторяются в полном виде, поскольку дать ссылку на них невозможно. Присутствуют опечатки и стилистические погрешности (например, на стр. 97–98 указаны ссылки на рис. 69, вместо рис. 49, и др.).

Высказанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертации и не затрагивают общего представления о ней, как о добротной и детально выполненной работе.

Заключение

Диссертационная работа представляет собой завершённое исследование на актуальную тему. Сделанные выводы и рекомендации обоснованы. Новые научные результаты, полученные автором, имеют существенное значение для наблюдательной астрономии, физики Солнца, атмосферной оптики и физики атмосферы. Они необходимы также при выборе оптимальных мест размещения астрономических наземных телескопов.

В работе представлены результаты, положения и выводы, совокупность которых, согласно требованиям п. 8 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», можно рассматривать как законченную самостоятельную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком теоретическом и экспериментальном уровне. **Работа отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор А.Ю. Шиховцев заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – физика Солнца.**

Официальный оппонент,

Ведущий научный сотрудник

Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,

доктор физ.-мат. наук

В.В. Носов

Шифр и наименование научной специальности,
по которой защищена докторская диссертация
официального оппонента:

01.04.05 – оптика.

Почтовый адрес официального оппонента:

634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1,
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

E-mail: nosov@iao.ru

Тел. 8-913-808-2070

Подпись д.ф.-м.н. Носова В.В. заверяю.

Ученый секретарь Института оптики атмосферы
им. В.Е. Зуева СО РАН, кандидат физ.-мат. наук



О.В. Тихомирова