

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 532.507 + 519.6

Формирование турбулентности в астрономических обсерваториях юга Сибири и Северного Кавказа

В.В. Носов, В.П. Лукин, Е.В. Носов, А.В. Торгаев*

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

Поступила в редакцию 29.06.2018 г.; после доработки 24.01.2019 г.

Статья представляет собой обзор собственных исследований авторского коллектива. Приведены результаты исследований основных характеристик астроклимата (структуры турбулентных полей и условий их формирования) в ряде российских астрономических обсерваторий юга Сибири и Северного Кавказа (Саянская солнечная, Байкальская астрофизическая, Специальная астрофизическая обсерватории, Центр лазерного зондирования Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Обсерватория Кольванского хребта). Экспериментальные результаты получены из долговременных рядов наблюдений астроклимата (экспедиции 2006–2017 гг.) с помощью малогабаритной ультразвуковой метеостанции; теоретические – численным решением различных краевых задач для уравнений Навье–Стокса. Установлено присутствие над территориями обсерваторий областей когерентной (неколмогоровской) турбулентности, причиной формирования которых являются рельеф местности и неравномерность нагрева подстилающей поверхности. В подкупольных помещениях зарегистрированы присутствие крупных вихревых когерентных структур и наличие когерентной турбулентности. Численное моделирование позволяет выполнить анализ влияния конструктивных особенностей и температурных режимов элементов телескопа, а также тестирование оптических характеристик телескопа, включая минимизацию влияния внешней и подкупольной турбулентности. Сделан краткий обзор истории возникновения и эволюции понятий «когерентная структура» и «когерентная турбулентность» по данным мировой научной литературы.

Ключевые слова: когерентная турбулентность, неколмогоровская турбулентность, астроклимат, когерентная структура; coherent turbulence, non-Kolmogorov turbulence, astroclimate, coherent structure.

Введение

Как известно, качество астрономических изображений зависит от состояния земной атмосферы над астрономическим оптическим приемником. Характеристики этого состояния называются астроклиматом. Точнее, астроклиматом называется совокупность оптических свойств атмосферы, определяющая эффективность астрономических наблюдений. Следовательно, астроклимат определяется климатом и рельефом географического региона, где расположен наземный астрономический приемник. Астроклимат включает достаточно много составляющих, например молекулярное и аэрозольное рассеяние и поглощение излучения, регулярную рефракцию, турбулентность и др. Однако в условиях, при которых обычно проводятся астрономические наблюдения (слабо замутненная безоблачная атмосфера), главной составляющей астроклимата, существенно влияющей на качество астрономических изображений, становится атмосферная турбулентность.

Согласно [1, 2] локальная приземная турбулентность в районах размещения астрономических

приемников и павильонные турбулентные эффекты внутри больших закрытых специализированных (подкупольных) помещений телескопов могут давать до 40 и более процентов вклада в ухудшение качества получаемого изображения. Поэтому проблема выбора мест размещения новых телескопов остается актуальной. Однако и для уже существующих телескопов, чтобы иметь возможность предпринять соответствующие меры по устранению негативных воздействий на изображение, часто необходимо знать степень влияния места расположения, а также формы и конструкций здания (башни) телескопа. В этой связи остаются важными и актуальными исследования структуры турбулентных полей в окрестностях астрономических обсерваторий и подкупольных пространствах телескопов, включая исследования условий формирования турбулентности.

Настоящая статья имеет характер обзора собственных исследований авторского коллектива. Приведены результаты исследований основных характеристик астроклимата (структуры турбулентных полей и условий формирования турбулентности – над территориями и в закрытых специализированных помещениях) в ряде российских астрономических обсерваторий юга Сибири и Северного Кавказа: Саянская солнечная обсерватория (ССО) Института солнечно-земной физики (ИСФЗ) СО РАН,

* Виктор Викторович Носов (nosov@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Евгений Викторович Носов (nev@iao.ru); Андрей Витальевич Торгаев (torgaev@iao.ru).

Байкальская астрофизическая обсерватория (БАО) ИСЗФ, Специальная астрофизическая обсерватория (САО) РАН, Обсерватория Кольванского хребта (ОКХ), Центр лазерного зондирования (ЦЛЗ) Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Экспериментальные результаты получены из долговременных рядов наблюдений астроклимата по результатам экспедиций за период 2006–2017 гг. с использованием малогабаритной ультразвуковой метеостанции; теоретические – с помощью численных решений различных краевых задач для уравнений Навье–Стокса. Так как большая часть информации о структуре турбулентных потоков содержится в спектрах флуктуаций температуры, то основное внимание здесь уделено спектральным характеристикам.

В настоящей статье поставлена цель систематизировать результаты исследований локальной структуры турбулентности в каждом из географических регионов, где расположены обсерватории.

В результате экспедиционных работ, проведенных в горных и равнинных условиях, накоплена обширная экспериментальная база данных приземных измерений основных параметров турбулентности в различных географических районах и метеоситуациях [3]. Наблюдения в открытой атмосфере и закрытых помещениях обсерваторий позволили обнаружить крупные когерентные структуры в виде протяженных областей когерентной турбулентности, в которых определяющее влияние имеет одна когерентная структура. Более того, характерные признаки когерентных структур в той или иной степени присутствуют в большинстве накопленных данных. Колмогоровская турбулентность (устойчивое в литературе [4–9] название турбулентности, образующейся в картине турбулентного движения по А.Н. Колмогорову [10, 11]) обнаруживается, как правило, только над обширными участками с ровной и однородной подстилающей поверхностью.

В настоящее время понятия «когерентная структура» и «когерентная турбулентность» активно используются специалистами по теории турбулентности, в то время как идеи этих понятий еще в 1938 г. предложили основоположники современной теории когерентной турбулентности Л. Прандтль (L. Prandtl), Т. фон Карман (Th. von Karman) и В. Толмин (W. Tollmien). Ниже представлен краткий обзор истории возникновения и эволюции этих понятий. Обзор сделан по данным мировой научной литературы и может представлять интерес для специалистов.

1. История возникновения и эволюции понятий «когерентная структура» и «когерентная турбулентность» в теории турбулентности

Предваряя краткий исторический обзор по когерентным структурам и когерентной турбулентности, в сжатом виде приведем хронологию научных исследований процесса формирования (возникновения) турбулентности. Г. Хаген (G. Hagen), с 1839 г.

исследуя режимы течения струи воды, в 1869 г. [12] установил: возврат из турбулентного режима в ламинарный происходит при совокупности величин радиуса трубы, скорости и температуры, меньших некоторого значения, однако он не обобщил свои результаты в виде закона. О. Рейнольдс (O. Reynolds) – основоположник научной теории турбулентности (согласно [8, 9]), в 1883 г. [13] определил условия перехода ламинарного течения в турбулентное и сформулировал общий критерий динамического подобия течений вязкой несжимаемой жидкости. А. Бенар (H. Benard) в 1900 г. [14] исследовал конвекцию вследствие неустойчивости из-за зависимости коэффициента поверхностного натяжения жидкости от температуры; Л. Прандтль в 1904 г. [15] – движение жидкости в пограничном слое. Дж. Стретт (J. Strutt), он же Лорд Релей (Lord Rayleigh), в 1916 г. [18] исследовал конвекцию вследствие неустойчивости из-за температурной неоднородности жидкости. Л. Ричардсон (L. Richardson) в 1922 г. [19] установил, что в основе турбулентности лежит процесс каскадной передачи энергии; развитая турбулентность образована иерархической совокупностью вихрей разного размера. Дж. Тейлор (sir G.I. Taylor) в 1935–1936 г. [16] опубликовал статистическую теорию турбулентности. Т. фон Карман в 1938 г. [20] представил статистическую теорию изотропной турбулентности. А.Н. Колмогоров в 1941–1942 гг. [10, 11] представил картину турбулентного движения в настоящем понимании локальной структуры турбулентного потока. А.М. Обухова в 1946 г. [21] представил результаты исследований турбулентности в температурно-неоднородной атмосфере; А.С. Монин в 1950 г. [22] опубликовал результаты исследования динамической турбулентности в атмосфере, в 1953 г. [23] – турбулентного теплообмена над нагретой поверхностью. А.С. Монин и А.М. Яглом в 1965–1967 гг. обобщили теорию турбулентности в монографии «Статистическая гидромеханика» [8, 9].

1.1. Когерентные структуры и их смеси

Как известно [17, 24–30], экспериментальные данные измерений параметров турбулентности в различных географических районах и метеоситуациях свидетельствуют о существовании в турбулентной атмосфере крупномасштабных детерминированных образований – энергонесущих вихрей, которые в мировой научной литературе получили наименование «когерентные структуры». Такие образования ранее носили название «макроструктурные элементы турбулентности» – турбулентные образования, содержащие основную долю энергии турбулентности» [31. С. 286].

В литературе также используются следующие термины [17, 32–36]: когерентные вихревые структуры, когерентные образования, квазидетерминированные когерентные структуры, коррелированные (организованные) структуры, упорядоченные пространственно-временные образования, упорядоченные пространственные (вихревые) структуры, крупномасштабные (упорядоченные) макроструктуры,

(само)организованные структуры, устойчивые вихревые образования, турбулентные тела и т.д. В иностранных источниках ранее широко применялся термин *energy-containing eddies* [32, 37–39], наряду с которым позднее использовались такие наименования, как *coherent structures*, *coherent flow structures*, *coherent vortex structures*, *large eddy structures*, *large coherent eddies*, *gigantic internal structures*, *organized structures* и т.п. [40–45]

Особая роль макроструктурных элементов турбулентности в энергетическом спектре турбулентных движений отмечена А.С. Мониным в 1962 г. в [46. С. 10] в спектре, состоящем из четырех интервалов: 1) «область малых волновых чисел, соответствующих макрокомпоненте или осредненным полям скорости ветра и температуры»; 2) «интервал макроструктурных элементов турбулентности, содержащий почти всю энергию турбулентности»; 3) инерционный интервал; 4) интервал диссипации.

Подобным образом спектр представлен П.А. Воронцовым в 1966 г. в [47. С. 127] для вихрей в атмосфере: 1) «самые крупные вихри в диапазоне самых низких частот», 2) «крупные вихри, несущие основную турбулентную энергию», 3) вихри инерционного интервала, 4) вязкий интервал с малым размером вихрей. В 1976 г. в [34] приведен обобщенный энергетический спектр, состоящий из пяти областей. На то, что основная часть энергии турбулентных пульсаций сосредоточена в крупномасштабных неоднородностях, указывает В.И. Татарский в 1959 г. в работе [48] и в 1967 г. — в [49]. Позднее интервалы 1 и 2 были объединены в один — энергетический [4, 6, 33, 49, 50] (или интервал энергии [8, 9]).

Турбулентные вихревые структуры известны довольно давно. О. Рейнольдс в 1883 г. [13. С. 92], наблюдая за участком течения в трубке с водой, на котором ламинарное движение переходит в вихревое, обнаружил, что в массе смешанной с краской воды при свете вспышек электрической искры хорошо различимы четкие завитки, показывающие вихри (*curls showing eddies*). Н.Е. Жуковский в 1919 г. [51] указывает на формирование при определенной скорости в завихренном потоке речного русла отдельных эллиптических вихрей с центрами, движущимися горизонтально. И. Никурадзе (J. Nikuradse) в 1929–1931 гг. [52], используя кинематографическую съемку на движущейся тележке, фиксировал крупные вихревые структуры в течении канала. Л. Прандтль в 1933 г. [53] описал долгоживущую крупномасштабную вихревую структуру в пограничном слое турбулентного течения в канале, визуализированную при помощи алюминиевых опилок. Согласно Х. Драйдену (H. Dryden) [54. С. 25] в 1938 г. Т. фон Карман, обсуждая измерения флуктуаций скорости турбулентности в канале, высказал мнение о существовании своего рода статистического подобия между флуктуациями в разных точках области, не слишком близкой к стене или к центру канала; в ответной дискуссии Л. Прандтль и В. Толмин высказали предположение, что турбулентные флуктуации могут состоять из двух компонентов, один из которых — производный из гармонической

функции (*derivable from a harmonic function*), а другой — удовлетворяющий уравнению типа теплопроводности, т.е. недиффузионной и диффузионной компонент, или независимого и зависимого от вязкости типов.

Значительный вклад в изучение когерентных структур внес А. Таунсенд (A. Townsend): работы 1947–1951 гг. [37, 55] и особенно монография 1956 г. [38], в которых обстоятельно исследованы крупномасштабные вихревые структуры и их роль в турбулентных течениях. А.С. Монин в 1958 г. [31. С. 286] описал роль «макроструктурных элементов» — турбулентных образований, содержащих основную долю энергии турбулентности». Г.Н. Шур в 1964 г. [56] в самолетных исследованиях турбулентности в атмосфере в ряде случаев обнаружил отклонение наклона спектральных кривых в инерционном интервале от закона « $-5/3$ » в сторону больших значений; в 1976 г. [34] зарегистрирован наклон спектров со значением $-2,67 = -8/3 \approx -3$ (что соответствует условиям когерентной турбулентности).

Построение теории когерентных структур на современном этапе, согласно [8, 9], началось с работы Г. Брауна (G. Brown) и А. Рошко (A. Roshko) 1974 г. [40] о когерентных структурах в плоском слое перемешивания. В 1974 г. в г. Саутгемптоне (Southampton) состоялся colloquium по когерентным структурам в турбулентности [41]. В отечественных публикациях термин «когерентная структура» упоминается в 1977 г. в докладе Е.В. Власова, А.С. Гиневского, Р.К. Каравосова [57. С. 206] об обнаружении когерентной структуры турбулентных струй. В то же время с учетом замечаний А.С. Монина, что когерентные структуры первоначально назывались «макроструктурными элементами» турбулентности» [8. С. 77] и «когерентные структуры», давно известные в механике турбулентности под наименованием «макроструктурных элементов»» [58. С. 62], дату следует отнести на 1958 г., когда он указал на такие структуры [31. С. 286].

Несмотря на обилие публикаций, указать дату начала употребления термина *coherent structure* все же представляется затруднительным, поскольку такое устойчивое словосочетание встречается вне контекста исследований турбулентности в литературных источниках, по крайней мере, с 1801 г. [59] и в научных изданиях по физике с 1852 г. [60]. Тем не менее можно с большой степенью уверенности сказать, что сама идея, лежащая в основе понятия «когерентная структура» о том, что турбулентные флуктуации могут быть представлены в виде композиции когерентной составляющей и случайной некогерентной, была сформулирована в 1938 г. в дискуссии основоположников теории когерентной турбулентности Прандтля–Кармана–Толмина [54].

В литературе встречается множество определенных когерентных структур. Например, Х. Липман (H. Liepmann) в 1952 г. [61. С. 414] о вторичной крупномасштабной структуре (*secondary, large scale structure*) турбулентного течения писал, что если рассматривать турбулентность как своего рода вторичную структуру, наложенную на поток обычной вязкой жидкости, то крупномасштабное движение

можно рассматривать как надструктуру уже на турбулентном движении. П. Брэдшоу (P. Bradshaw) в 1967 г. [62. С. 637] указывает, что большие вихри в турбулентном сдвиговом потоке образуют когерентную и идентифицируемую группу (coherent and identifiable group), влияют на процесс распределения путем искажения границы между турбулентной и нетурбулентной жидкостями. Р. Каплан (R. Kaplan) и Дж. Лауфер (J. Laufer) в 1968 г. в [43. С. 236], отмечая возрастающее количество подтверждений того, что полностью развитые турбулентные сдвиговые течения демонстрируют более когерентную, чем обычно ожидается, структуру скоростей, определили когерентную структуру (“coherent structure”) как связанную с движением границы раздела между турбулентной и нетурбулентной жидкостью на внешнем краю пограничного слоя. Х. Липман в 1972 г. в [45. С. 202] писал, что когерентные структуры (“coherent structures”) – уединенные волны в нелинейной теории волн, т.е. структуры потока (“flow patterns”), не только долгоживущие, но и сохраняющие выраженное подобие даже при сильном взаимодействии. Ю.И. Хлопков, В.А. Жаров, С.Л. Горелов в 2002 г. в работе [63], посвященной когерентным структурам, определили когерентную структуру как связанную крупномасштабную турбулентную жидкую массу с завихренностью, скоррелированной по фазе во всей области пространства, занимаемого структурой.

А.С. Монин и А.М. Яглом [8. С. 156] определяют когерентные структуры как «предпочтительные нелинейные суперпозиции крупномасштабных пространственных компонент турбулентности, имеющие большие времена жизни (или, иными словами, обладающие наименьшей неустойчивостью по отношению к возмущениям, существующим в турбулентном течении)». По-видимому, это наиболее простое из имеющихся определений когерентной структуры (см., например, [38, 55, 64–66]). В первых определениях [38, 55] использовалось разложение мгновенного поля скоростей на когерентную крупномасштабную и случайную некогерентную турбулентную компоненты (двойное разложение [55]). Позднее стали применяться более сложные разложения (например, тройное [64, 65]). В соответствии с этими определениями турбулентность состоит из неслучайных когерентных (крупномасштабных) и чисто случайных (мелкомасштабных) движений. При этом случайные мелкомасштабные движения не зависят от крупномасштабных. Случайные накладываются на когерентные и обычно простираются далеко за границы когерентной структуры.

Когерентные структуры активно изучаются в настоящее время (см., например, [67–73]). Исследуются пристеночная мелкомасштабная турбулентность, турбулентная конвекция в приземном слое атмосферы при ветровом сдвиге, «облачные улицы» в атмосфере, «циркуляция Ленгмюра» в морях и озерах. Изучаются также периодические крупные вихри в струях за реактивными двигателями и др. Показано, что в турбулентных течениях основными энергоносителями являются крупномасштабные упорядоченные вихри, которые существенно влияют на

формирование всех характеристик потока. Установлено, что крупномасштабные турбулентные движения детерминированы, т.е. не случайны. В исследованиях применяются различные методы визуализации турбулентности (обычно подкрашивание течений). Однако разрешающая способность используемых методов визуализации невелика. Поэтому удается четко зарегистрировать, как правило, только крупномасштабные компоненты турбулентных потоков.

Как следует из наших результатов [74–76], энергонесущий вихрь (ассоциированный с когерентной структурой в соответствии с ее ранними определениями) когерентно распадается. При этом процесс когерентного распада главного энергонесущего вихря на более мелкие не заканчивается в области крупномасштабных (низкочастотных) вихрей. Он непрерывно продолжается в мелкомасштабной (высокочастотной) области вплоть до размеров мелких вихрей, которые еще могут существовать в воздухе (0,6–1,2 мм [8, 9]). Частоты мелкомасштабных вихрей кратны частоте главного вихря. Фазы колебаний в этих вихрях жестко связаны, а сами вихри являются когерентными (синфазными). Поэтому процесс когерентного распада нельзя ограничить областью крупномасштабных вихрей (как это делается на основании старых определений когерентной структуры). При этом мелкомасштабные вихри оказываются зависимыми от крупномасштабных (от частоты главного вихря).

В наших работах [28, 77] понятие «когерентная структура» было расширено: гидродинамической когерентной структурой называется компактное образование, включающее в себя долгоживущую пространственную вихревую структуру (ячейку), возникающую в результате продолжительного действия термодинамических градиентов, и продукты ее дискретного когерентного каскадного распада. В расширенном понимании когерентная структура есть солитонное решение уравнений гидродинамики (топологический трехмерный солитон, уединенная волна). Это либо односолитонное решение, либо один солитон в многосолитонном решении. Когерентная структура содержит как крупномасштабную, так и мелкомасштабную турбулентность. Турбулентность, возникающая в результате распада главного вихря, является когерентной (синфазной) и детерминированной [30, 74–76]. Частота когерентно распадающегося главного вихря – основной признак когерентной структуры. Размеры когерентной структуры нечеткие. Течения, внешние по отношению к главному вихрю, могут переносить продукты его распада на значительные расстояния, образуя длинный турбулентный след. Время жизни когерентной структуры определяется временем действия термодинамических градиентов [28, 77]. Результаты наших исследований также показывают, что известные процессы перехода ламинарных течений в турбулентные (конвекция Релея–Бенара, обтекание жидкостью препятствий и др.) можно считать когерентными структурами (или суммами таких структур).

Когерентные структуры важны для понимания процессов формирования (возникновения)

турбулентности и дальнейшей эволюции структуры турбулентности. Поэтому в [3, 78] кратко перечислены установленные нами ранее свойства одиночных когерентных структур и свойства смесей (сумм) различных когерентных структур. В настоящий момент таких свойств насчитывается уже около 30.

1.2. Когерентная турбулентность

Естественным продолжением новой волны интереса к когерентным структурам в 1960–1970-х гг. стало появление термина «когерентная турбулентность». Он зафиксирован в работах А. Михалке (A. Michalke) и Г. Фукса (H. Fuchs) в 1975 г. [42. С. 190] (посвящена исследованиям процессов возникновения шума в струях от крупномасштабной когерентной турбулентности (“large-scale coherent turbulence”)), а также в докладе Р. Адриана (R. Adrian) в 1975 г. о роли условного среднего в теории турбулентности и обнаружении когерентной турбулентности [44. С. 323] на IV симпозиуме по турбулентности в жидкостях. V симпозиум по турбулентности 1977 г. был посвящен, в том числе, стабильности и переходу в пограничных слоях, колебаниям давления на стенке, связанным с когерентной турбулентностью, и крупномасштабным турбулентным структурам в турбулентности (“...stability and transition in boundary layers, wall pressure fluctuations related to coherent turbulence, and large-scale turbulent structures in turbulence”) [79. С. 1]. А. Хусейн (A. Hussain) в 1981 г. замечает, что когерентная и фоновая турбулентности некоррелированы (“the coherent and background turbulence are uncorrelated” [80. С. 260]), при этом фактически фоновая турбулентность создается и организуется когерентными структурами.

В отечественных исследованиях термин «когерентная турбулентность» встречается в 1991 г. в [33] (на с. 201 в отношении формирования когерентной турбулентности выдвинута гипотеза: «...хотя первоисточником и стохастической, и когерентной турбулентности является потеря устойчивости крупномасштабным потоком, значительный вклад в формирование последней, вероятно, вносится и самоорганизацией мелкомасштабной турбулентности при процессе нелинейного взаимодействия ее элементов»). Л.Г. Лойцянский в 1998 г. в работе [81] обратил внимание на применение методов нелинейной механики и теории динамических систем к описанию турбулентных процессов, на развитие «когерентной» турбулентности, упоминая в этой связи А. Рошко, Г.Н. Абрамовича, А.С. Гиневского и А.С. Власова. В специальной монографии Ю.И. Хлопкова, В.А. Жарова и С.Л. Горелова в 2002 г. сделан интересный и далеко идущий вывод: «Когерентные структуры и создают, и пространственно упорядочивают некогерентную турбулентность, т.е. когерентная и некогерентная турбулентности не являются полностью несвязанными» [63. С. 73]. Л.Г. Лойцянский в 2003 г. в [82. С. 615], упоминая «сравнительно новый раздел теории турбулентности, посвященный так называемой когерентной турбулентности», заме-

чает, что взаимодействие крупных вихрей подчиняется законам «когерентной турбулентности», отличающимся от законов переноса, о чем говорит нулевой коэффициент турбулентной вязкости в экспериментах. А.В. Колесниченко и М.Я. Маров в 2015 г. в [83. С. 319] «при анализе модели когерентной турбулентности» придерживаются главным образом сценария Ландау–Хопфа.

Необходимо особо отметить работы М.А. Гольдштрика и В.Н. Штерна 1981 г. в [84] (по докладу 1980 г.) и 1982 г. в сборнике [85], где сформулированы идеи нового для своего времени научного направления – теории «структурной турбулентности»; суть явления заключается в реализуемости в поле течения почти одного и того же детерминированного пространственно-временного образования через случайные промежутки во времени и пространстве. Учитывая, что изложенные идеи и понятия в целом соответствуют направлению когерентной турбулентности, дату появления идеи термина следует отнести к 1980 г.

Дальнейшее развитие (и детализацию) понятие «когерентная турбулентность» получило в основном в работах авторов настоящей статьи [3, 7, 28, 74, 75, 78, 86, 87]. В них область когерентной турбулентности определяется следующим образом.

Пусть в некоторой пространственной области имеется несколько когерентных структур. Если размеры главного энергонесущего вихря одной из этих структур значительно больше размеров главных вихрей всех других имеющихся в области структур, то такая область пространства называется областью с определяющим влиянием одной когерентной структуры, или областью когерентной турбулентности.

При этом если в области когерентной турбулентности разделить скорость течения гидродинамической среды на крупномасштабные и мелкомасштабные составляющие (разделение достаточно условно и определяется предельными возможностями используемых методов регистрации/визуализации), то крупномасштабные составляющие скорости течения будут соответствовать одному главному энергонесущему вихрю наибольшей когерентной структуры (и наиболее крупным продуктам его когерентного распада). Мелкомасштабные составляющие в этой рассматриваемой области содержат как мелкомасштабные компоненты распада этой крупной структуры, так и другие малые когерентные структуры. По существу, в области когерентной турбулентности реализуется аналог двойного разложения [55], которое послужило в свое время экспериментальной основой для ранних определений когерентной структуры [38, 55, 64, 65].

В работах [78, 87–93] показано, что реальную атмосферную турбулентность можно рассматривать как смесь различных когерентных структур с несоизмеримыми частотами главных энергонесущих вихрей. Если в одной когерентной структуре семейство распадаемых вихрей (продуктов каскадного распада) является когерентным (синфазным), то при смешивании разных когерентных структур с несоизмеримыми частотами главных вихрей элементы одного семейства будут несинфазны (некогерентны)

элементам другого семейства. Поэтому турбулентность, возникающую при смешивании разных когерентных структур (с несоизмеримыми частотами главных вихрей), естественно называть *некогерентной*. Однако если мы рассматриваем область с одной когерентной структурой, семейство распадных вихрей в которой (продуктов каскадного распада) когерентно, то такая турбулентность является *когерентной*.

Понятия «когерентная турбулентность» и «колмогоровская турбулентность» можно выразить и на языке спектров параметров турбулентного движения. Сформулированные таким образом, они соответствуют предыдущим определениям и уточняют (конкретизируют) их.

Так, например, в [87–92] установлено, что экспериментальные спектры реально наблюдаемой атмосферной турбулентности представляют собой суммы спектров отдельных когерентных структур разных размеров (с различными внешними масштабами). При одинаковой интенсивности турбулентности кривая, соответствующая инерционному интервалу одномерного спектра турбулентности, является верхней огибающей всех спектров разных когерентных структур, имеющих различные внешние масштабы турбулентности.

Если разница между масштабами невелика, то сумма спектров разных когерентных структур в инерционном интервале практически не отличается от колмогоровской $5/3$ -степенной зависимости. Такая турбулентность соответствует турбулентности, образующейся в картине турбулентного движения по А.Н. Колмогорову [10, 11]. Как видно, колмогоровская турбулентность представляет собой смесь различных (и близких по размерам) когерентных структур с несоизмеримыми частотами главных энергонесущих вихрей. В соответствии с вышеуказанными определениями колмогоровская турбулентность есть некогерентная турбулентность.

Если разница между масштабами велика, то сумма спектров имеет глубокий провал, в котором «обнажается» одна крупная когерентная структура с $8/3$ -степенным убыванием спектра. Турбулентность в этом случае соответствует турбулентности в одной когерентной структуре и имеет название «когерентная». Она представляет собой одно семейство распадных когерентных (синфазных) вихрей — продуктов каскадного распада одного главного энергонесущего вихря.

Таким образом, если в рассматриваемой области когерентные структуры имеют близкие размеры и «хорошо смешаны», то наблюдается *изотропия турбулентности, описываемая колмогоровским спектром (колмогоровская турбулентность)*. Если же одна из когерентных структур существенно больше других (или же структуры значительно удалены друг от друга), то наблюдается *анизотропия турбулентности, описываемая спектром когерентной турбулентности (когерентная турбулентность)*.

Когерентная турбулентность обладает рядом интересных свойств [3, 94, 95]. Она (рис. 1, временной

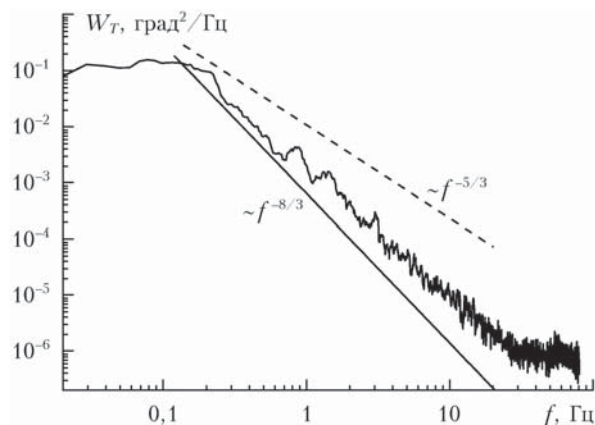


Рис. 1. Частотный спектр флуктуаций температуры. Когерентная турбулентность. ССО, вблизи поверхности, 29.09.2013 г.

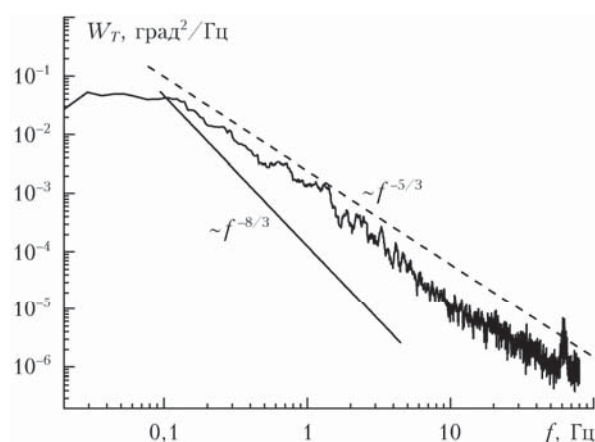


Рис. 2. Частотный спектр флуктуаций температуры. Колмогоровская турбулентность. ССО, вблизи поверхности, 14.08.2014 г.

частотный спектр флуктуаций температуры $W_T \sim f^{-8/3}$ в инерционном интервале) отличается от колмогоровской (рис. 2, $W_T \sim f^{-5/3}$ в инерционном интервале), в первую очередь, более быстрым убыванием частотного спектра флуктуаций температуры в инерционном интервале и меньшим вкладом высокочастотных компонент (мелкомасштабных вихрей). Время жизни областей когерентной турбулентности — от 4 мин до 2 ч, иногда более. По сравнению с колмогоровской турбулентностью в когерентной происходит значительное *ослабление фазовых и слабых амплитудных флуктуаций* распространяющегося в атмосфере оптического излучения [28–30]. Явление ослабления оптических флуктуаций в когерентной турбулентности позволило авторам настоящей статьи выработать ряд рекомендаций [96–98] по выбору оптимальных мест размещения наземных астрономических телескопов.

Отдельно остановимся на вопросах локальной структуры атмосферной турбулентности. Под локальной структурой турбулентности понимаются гидродинамические закономерности турбулентных движений внутри некоторого объема. Другими словами, локальная структура турбулентности — это «внутреннее

устройство» турбулентности в объеме. Локальная структура турбулентности, как выясняется, тесно граничит с понятиями «когерентная структура» и «когерентная турбулентность», которые напрямую связаны с физическими механизмами формирования турбулентности.

1.3. О выяснении локальной структуры атмосферной турбулентности в исследуемом регионе

В связи с чрезвычайной сложностью индивидуального описания турбулентных гидродинамических полей вопрос о локальной («внутренней») структуре развитой турбулентности обычно не возникает, для описания турбулентных течений вынужденно используются статистические методы, которые активно применяются, например, в полуэмпирической теории турбулентности. Для атмосферы полуэмпирическая теория называется теорией подобия Момина—Обухова. В настоящее время она, как известно, дает удовлетворительные ответы на многие практические вопросы. Однако данная теория обычно не проясняет физические механизмы возникновения и локальную структуру турбулентности. В то же время вопросы о локальной структуре турбулентности (ее «внутреннем устройстве») имеют большое значение в теории турбулентности.

Исследования локальной структуры турбулентности были начаты с изучения характеристик турбулентности в закрытых локальных объемах (закрытых помещениях) [74–76, 86]. Турбулентность в закрытых помещениях можно рассматривать как частный случай турбулентности, наблюдаемой в аннотропном пограничном слое. Исследования в этом направлении позволили нам получить ряд важных результатов о когерентных структурах и в целом о локальной структуре турбулентности. В результате исследований выяснилось, что когерентные структуры являются важными элементами для понимания процессов возникновения и дальнейшей эволюции структуры турбулентности. Из свойств когерентных структур следует, что *когерентную структуру (в расширенном определении), несмотря на ее сложное внутреннее строение, можно рассматривать как основной базисный структурный элемент, из которого состоит турбулентность*. Этот вывод проясняет внутреннюю структуру («внутреннее устройство») турбулентности, и его можно рассматривать как основной результат исследований локальной структуры турбулентности, который детально обсуждается в работах [78, 87–93].

В настоящее время приближенную структуру течений среды внутри одной когерентной структуры можно считать в достаточной степени известной. Неизвестным обычно является пространственное распределение когерентных структур по размерам в изучаемых географических регионах. Если известны конкретный состав и сочетание размеров когерентных структур, то (после построения приближенной картины воздушных течений в пограничном слое атмосферы) можно говорить о выяснении локальной структуры турбулентности в регионе. Таким обра-

зом, для целей исследования свойств атмосферной турбулентности и целей улучшения качества астрономических изображений возникает проблема нахождения и идентификации крупных когерентных структур (и соответствующих им областей когерентной турбулентности).

Наиболее просто картина течений строится при обнаружении области когерентной турбулентности. Тогда учет типа подстилающего рельефа, типа солнечной активности (зависящей от времени суток), типа облачности, скорости и направления среднего ветра (и других метеопараметров), а также характерных частот микрометеорологического интервала спектра позволяет установить радиус и направление вращения наиболее крупного энергонесущего вихря в пограничном слое. Можно также определить размеры внешнего масштаба турбулентности (важная характеристика среды в атмосферно-оптических исследованиях), который обычно является одним из первых продуктов каскадного распада энергонесущего вихря. На основе анализа спектров турбулентности рассчитываются эффективные внешние масштабы турбулентности для каждой из наиболее типичных наблюдаемых когерентных структур. Все эти результаты помогают в решении задач о выяснении локальной структуры турбулентности в изучаемых географических регионах.

Результаты систематизации исследований локальной структуры турбулентности в географических регионах выбранных обсерваторий позволяют выработать практические рекомендации по наиболее благоприятному режиму проведения астрономических наблюдений в обсерваториях.

2. Общие характеристики обсерваторий и главные результаты исследований

Результаты оптико-метеорологических измерений (полевые экспедиции 2006–2017 гг.) позволили авторам настоящей статьи установить, что над территориями горных астрономических обсерваторий (Саянская солнечная, Байкальская астрофизическая, Специальная астрофизическая) наблюдается периодическая смена типа турбулентности, когда когерентная турбулентность сменяется (перемежается) колмогоровской. Это означает, что в экспериментах зарегистрирован эффект *перемежаемости типов турбулентности*. Теоретический анализ и эксперименты в экспедициях подтверждают [3], что эффект перемежаемости *возникает* при переносе ветром сформировавшихся в атмосфере областей когерентной турбулентности, *заключается* в периодическом ослаблении и усилении фазовых флуктуаций оптического излучения и *обусловлен* наличием большого числа областей когерентной турбулентности с наветренной стороны (и их последующим ветровым переносом).

Эффект перемежаемости, как видно из его описания, характеризует локальную структуру турбулентности над конкретным регионом. В сплошном

турбулентном поле имеются области изотропной колмогоровской турбулентности, в которых продукты распада близких по размерам когерентных структур хорошо перемешаны, и области неизотропной когерентной турбулентности с недостаточным перемешиванием. Эти области отделены друг от друга и переносятся ветром как единое целое. При непрерывной регистрации в приземной фиксированной точке мы наблюдаем перемежаемость характеристик турбулентности.

Экспериментальные результаты получены из долговременных рядов наблюдений дневного и ночного астроклимата с использованием малогабаритной ультразвуковой метеостанции «АМК-03» [99]. Теоретические результаты получены путем численного решения нескольких различных краевых задач для уравнений Навье—Стокса (с граничными условиями, заданными по данным экспериментальных измерений) с помощью свободного программного обеспечения [100]. Программно-численные модели закрытых помещений с конструкциями оптических инструментов сложной конфигурации построены аналитически с использованием методов аналитической конструктивной геометрии.

В экспедиционных полевых исследованиях в 2006—2017 гг. оптическими и метеорологическими методами получены следующие главные научные результаты: выявлены время и места возникновения областей когерентной и колмогоровской турбулентности над территориями обсерваторий, установлены их связи с типом подстилающей поверхности и направлениями скорости ветра, а также с типом микроклимата регионов. Для указанных регионов выяснено приближенное пространственное распределение когерентных структур по размерам; выработаны практические рекомендации по наиболее благоприятному режиму проведения астрономических наблюдений в обсерваториях. По существу, эти результаты решают задачу о выяснении локальной структуры турбулентности в географических регионах, где расположены обсерватории.

2.1. Саянская солнечная обсерватория

Результаты исследований процессов формирования турбулентности в этой обсерватории опубликованы в работах [3, 26, 28, 76, 87—90, 92—97, 101—116].

Саянская солнечная обсерватория ИСЗФ СО РАН расположена недалеко от пос. Монды, Бурятия, вблизи границы с Монголией. Измерения в ССО проводились преимущественно на автоматизированном горизонтальном солнечном телескопе (АСТ). Телескоп содержит целостатную установку, представляющую собой систему из двух плоских зеркал диаметром 80 см, которая обеспечивает непрерывное слежение за Солнцем. Целостат направляет солнечный свет на главное сферическое зеркало диаметром 80 см и фокусным расстоянием 20 м. Зеркало строит изображение Солнца на фотоприемнике. Изменялась дисперсия дрожания изображения края солнечного диска в зависимости от размера приемного

зеркала. Источником в эксперименте служил край солнечного диска. В качестве фотоприемника использовался датчик Брандта [117], являющийся фотоэлектрическим регистратором дрожания. Датчик Брандта прошел успешную апробацию в течение нескольких десятков лет и ранее применялся в аналогичных исследованиях рядом отечественных [118] и зарубежных ученых. Измерения были выполнены для различных диаметров приемного зеркала (апертуры) телескопа (1, 5, 10, 30, 50, 80 см) и для различных угловых размеров приемной щели регистратора датчика (25", 10"). Осуществлялся контроль зенитного угла положения Солнца. Одновременно с оптическими измерениями производился непрерывный контроль метеоситуации с помощью метеосистемы «АМК-03» [99] с определением типа турбулентности (когерентная или колмогоровская) вблизи здания АСТ.

В присутствии областей когерентной турбулентности (крупных когерентных структур) вблизи телескопа дисперсия дрожания изображения края солнечного диска существенно уменьшается (более чем в 2 раза). Так как дрожание изображений определяется главным образом фазовыми флуктуациями света в атмосфере, то отсюда следует, что зарегистрирован эффект ослабления фазовых флуктуаций света в когерентной турбулентности, который приводит к улучшению качества астрономических изображений.

В ССО метеоситуация меняется в зависимости от направления ветра. За время измерений зарегистрированы преимущественные взаимно противоположные направления среднего ветра: с юго-запада со стороны ровной подстилающей поверхности (оз. Хубсугул); с северо-востока со стороны Саянских гор, являющихся препятствием для воздушных потоков. При ветре со стороны Саянских гор значения структурной характеристики флуктуаций показателя преломления C_n^2 меньше значений при противоположном направлении ветра в несколько раз, при этом одномерные временные частотные спектры флуктуаций температуры (рис. 3) имеют 8/3-асимптотики в инерционном интервале, что есть признак присутствия когерентной структуры. При ветре со стороны ровной подстилающей поверхности (оз. Хубсугул) спектры соответствуют колмогоровской турбулентности (5/3-асимптотики). Стекающие с Саянских гор воздушные массы формируются в крупную долгоживущую когерентную структуру, внутрь которой попадают телескопы ССО.

Когерентная турбулентность в экспедициях в ССО, например в 2015 г., обычно возникала при направлении ветра с севера (со стороны гор Саянского хребта через глубокую долину р. Иркут). Среднее время ее жизни составляет 6—28 мин. Северное направление ветра в ССО наблюдается, как правило, ночью. При противоположном южном направлении ветра (со стороны ровной подстилающей поверхности и крупного оз. Хубсугул, наблюдается, как правило, днем) регистрируется в основном колмогоровская турбулентность со временем жизни 7—35 мин.

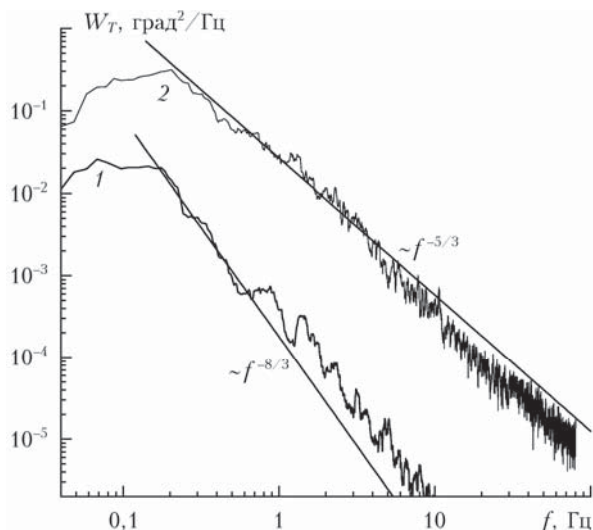


Рис. 3. Экспериментальный временной частотный спектр флуктуаций температуры. ССО, вблизи поверхности: 1 – когерентная турбулентность при ветре с Саянского хребта, 21.06.2010 г.; 2 – колмогоровская турбулентность при ветре с оз. Хубсугул, 22.06.2010 г.

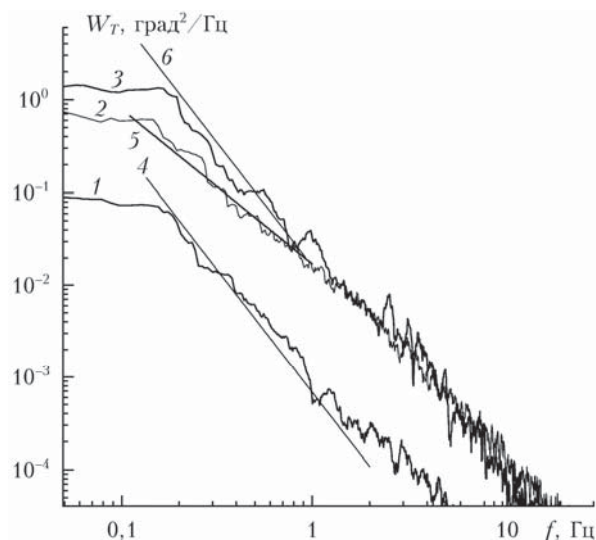


Рис. 4. Экспериментальный временной частотный спектр флуктуаций температуры. БАО, вблизи поверхности: 1 – БСВТ, южный ветер, день 12.08.2011 г.; 2 – БСВТ, западный ветер, вечер 13.08.2011 г.; 3 – БСВТ, северный ветер, ночь 13.08.2011 г.; 4, 6 – асимптотики $\sim f^{-8/3}$; 5 – $\sim f^{-5/3}$. 1, 3 – когерентная турбулентность, 2 – колмогоровская турбулентность

2.2. Байкальская астрофизическая обсерватория

Результаты исследований процессов формирования турбулентности в этой обсерватории опубликованы в работах [3, 25, 27, 29, 30, 74, 75, 77, 87–90, 92–97, 101–106, 108–111, 114–116].

Байкальская астрофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН расположена в пос. Листвянка Иркутской обл. на берегу оз. Байкал. На территории БАО распложены несколько оптических инструментов, среди которых основной – Большой солнечный вакуумный телескоп (БСВТ).

Измерения проводились вблизи приемного зеркала БСВТ, на площадке вблизи башни БСВТ на вершине горы (680 м над ур. м.), а также в целом в БАО на горных склонах – подступах к БСВТ. В результате измерений подтверждено существование над площадкой БСВТ устойчивой вихревой структуры воздушных потоков. Также сделан вывод, что установка на площадке дополнительных искусственных сооружений (вагончиков) приводит к существенному перераспределению над ней устойчивых вихревых образований.

В БАО метеоситуация меняется в зависимости от направления ветра. За время измерений зарегистрированы два преимущественных направления среднего ветра: южное – днем со стороны оз. Байкал; северное – ночью с гор в сторону оз. Байкал, при которых обнаруживается когерентная турбулентность (рис. 4). Промежуточные направления среднего ветра регистрируются главным образом утром и вечером и обычно приводят к появлению колмогоровской турбулентности.

Вблизи приемного зеркала телескопа БСВТ, предназначенного в основном для проведения дневных наблюдений, днем формируются области коге-

рентной турбулентности. Так как в когерентной турбулентности вследствие ослабления флуктуаций света качество изображений в телескопе улучшается, то измерения на БСВТ лучше выполнять днем. Это означает, что по астроклиматическим характеристикам солнечный телескоп установлен в оптимальном месте. Это существенная рекомендация для солнечных наблюдений на БСВТ в БАО. Она подтверждает эффективность произведенных ранее работ по выбору места для установки БСВТ.

Кроме того, в БАО зарегистрированы еще некоторые астроклиматические явления, приводящие также к улучшению дневных астрономических изображений. Во-первых, общий уровень флуктуаций температуры на площадке БСВТ (и в целом в БАО) летним днем оказывается сравнительно низким (понижены приземные значения структурной характеристики показателя преломления света C_n^2). Это явление повышает качество изображений в дневных наблюдениях на БСВТ и указывает на то, что астрономические измерения в БАО лучше выполнять днем. Во-вторых, площадка, на которой расположен БСВТ, покрыта слоем белой мраморной крошки, имеющей высокий коэффициент радиационного отражения. Из-за отражательных свойств мраморной крошки вблизи БСВТ возникает переохлажденный участок поверхности, над которым приповерхностные значения турбулентных характеристик, например C_n^2 , в среднем меньше, чем на поверхности без мраморной крошки. Поэтому можно говорить о явлении охлажденной пространственной области (полусферы). Телескоп оказывается внутри этой полусферы. Результаты измерений показали, что наличие переохлажденного участка подстилающей поверхности на площадке вокруг телескопа, покрытой

белой мраморной крошкой, блокирует развитие вертикальных конвективных потоков. В конечном счете это улучшает астроклимат вблизи телескопа и, следовательно, повышает качество астрономических изображений.

Проведены измерения характеристик локального астроклимата наиболее важных рабочих участков в специализированных помещениях БСВТ. К таким участкам внутри телескопа относится *павильон астрономического спектрографа БСВТ*, построенный по горизонтальной схеме Эберта и состоящий из закрытого павильона и рабочего места оператора. Павильон спектрографа представляет собой встроенное замкнутое достаточно теплоизолированное помещение с размерами около $5 \times 7 \times 16$ м. Рабочее место оператора располагается за стеной в смежном главном зале здания телескопа. Результаты измерений показали, что в павильоне наблюдаются заметные градиенты средней температуры, вследствие чего регистрируется высокий уровень флуктуаций температуры и показателя преломления. Показано, что температурные градиенты в помещениях БСВТ являются причиной возникновения ячейки Бенара (и когерентной турбулентности) в павильоне астрономического спектрографа. Главная причина возникновения градиента средней температуры в павильоне — разность температур окружающего воздуха и подстилающей поверхности. Поэтому величина и направление этого градиента зависят от времени суток и сезона.

Для теоретического исследования структуры турбулентных движений воздуха в закрытом объеме павильона спектрографа БСВТ (без обмена веществом среды через границы) численно решена краевая задача для уравнений гидродинамики (уравнений Навье—Стокса) с граничными условиями из экспериментальных данных натуральных измерений. Картины движений воздушной среды в павильоне спектрографа, полученные в результате численного моделирования и зарегистрированные нами экспериментально, практически совпадают. Внутри помещения наблюдаются уединенные крупные вихри (когерентные структуры, топологические солитоны), которые совместно могут быть интерпретированы как аналог конвективной ячейки Бенара, сформированной в закрытом прямоугольном объеме. Проведенное численное моделирование позволяет восстановить распределение параметров турбулентности на рабочих участках павильона, выполнить анализ влияния температурного режима павильона на качество формируемого в спектрографе изображения. Результаты решения краевой задачи с граничными условиями из измеренных данных подтверждают существование в воздухе павильона когерентной структуры и согласуются с результатами экспериментов (рис. 5).

На рис. 5 приведен временной нормированный спектр флуктуаций температуры $G(E) = fW_T(f)/\sigma_T^2$, где f — частота; σ_T^2 — дисперсия флуктуаций температуры; $E = f/f_0$ — нормированная частота, f_0 — характеристическая частота, соответствующая главному энергонесущему вихрю.

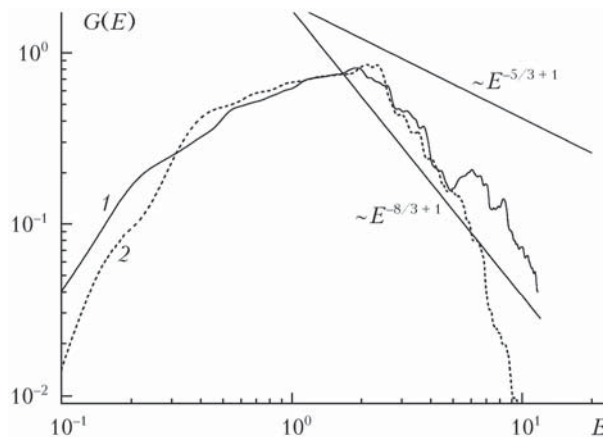


Рис. 5. Нормированный временной частотный спектр флуктуаций температуры $G(E)$. Спектрограф БСВТ, БАО: 1 — эксперимент 3.07.2007 г.; 2 — численное моделирование

Как видно, результаты моделирования спектра флуктуаций удовлетворительно согласуются с экспериментом. В соответствующем эксперименте спектре наблюдается протяженный инерционный интервал с $5/3$ -степенной зависимостью (обозначенный на рисунке как « $-8/3 + 1$ »), что соответствует $8/3$ -зависимости обычного ненормированного спектра W_T и характеризует когерентную турбулентность. В теоретическом спектре начальный участок инерционного интервала также описывается аналогичной зависимостью.

2.3. Центр лазерного зондирования ИОА СО РАН

Результаты исследований процессов формирования турбулентности в этом центре опубликованы в работах [119, 120].

В ЦЛЗ Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (Сибирская лидарная станция ИОА СО РАН, г. Томск) экспериментально и теоретически исследована структура турбулентных движений воздуха в закрытом подкупольном помещении шахты главного зеркала (диаметр 2,2 м) лидарной станции. Такие исследования необходимы для прогноза искажений лазерного излучения вблизи главного зеркала и его фокуса в подкупольном помещении. Они позволяют сделать оценки и дать прогноз эффективности самой лидарной станции.

Экспериментальные исследования характеристик турбулентности и теплообмена в подкупольном помещении были выполнены авторами настоящей статьи в декабре 2015 г. [119]. Измерения проведены с использованием малогабаритной переносной ультразвуковой метеостанции «АМК-03» [99] в разных точках по объему помещения. Измерения выявили наличие воздушных потоков (со средней скоростью до 0,4 м/с) внутри помещения по всей высоте шахты (15,6 м), в том числе в технологических зазорах между элементами конструкций. Установлены преимущественные вертикальные теплообменные направления движения воздуха внутри помещения шахты. Причиной возникновения тепловых потоков, как выяснилось, являлись градиенты средней температуры:

повышение температуры в нижней части помещения шахты в местах прилегания входных дверей в шахту из смежного теплого помещения; понижение температуры в верхней части помещения вследствие внешнего выхолаживания сдвижной крыши шахты.

Для теоретического исследования структуры турбулентных движений воздуха в закрытом помещении шахты лидарной станции (без обмена веществом среды через границы) численно решена краевая задача для уравнений Навье–Стокса с граничными условиями из данных натурных измерений. Моделирование помещения шахты главного зеркала и расположенных внутри него конструкций и оборудования произведено на основе данных натурных измерений габаритов помещения, конструкций и оборудования, температур поверхностей и данных сборочных чертежей.

В экспериментальных спектрах (рис. 6), также как и в теоретических, полученных из численного моделирования (рис. 7), наблюдается сравнительно протяженный инерционный интервал с $8/3$ -степенной зависимостью, что соответствует когерентной турбулентности. Таким образом, эксперимент и численное моделирование указывают на присутствие в шахте главного зеркала когерентной турбулентности. Как известно, когерентная турбулентность, по сравнению с колмогоровской, обеднена мелкомас-

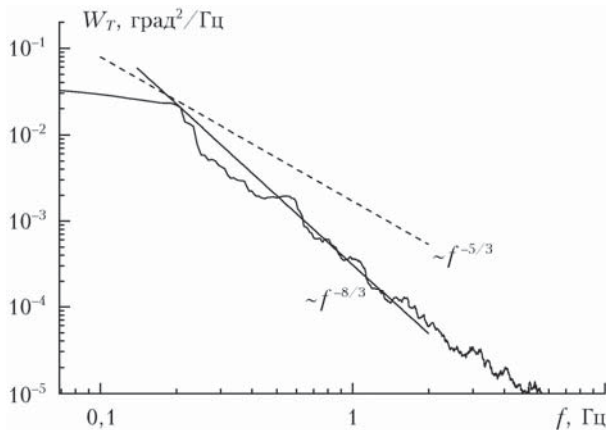


Рис. 6. Экспериментальный временной частотный спектр флуктуаций температуры в нижней точке, ЦЛЗ ИОА СО РАН

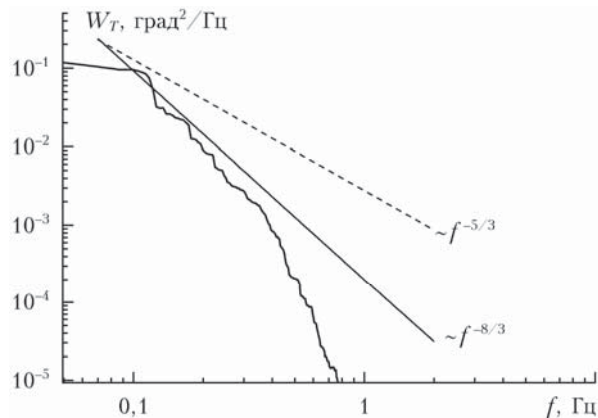


Рис. 7. Теоретический временной частотный спектр флуктуаций температуры в нижней точке, ЦЛЗ ИОА СО РАН

штабными неоднородностями, поэтому, на основании данных [28–30], в закрытой шахте главного зеркала можно ожидать ослабления фазовых флуктуаций оптического излучения и, следовательно, улучшения лидарных оптических изображений, что повышает эффективность лидарной станции.

Проведенный комплекс мероприятий по изучению структуры турбулентных движений воздуха в закрытой шахте главного зеркала лидарной станции (экспериментальные измерения и численное моделирование) можно рассматривать в качестве первого шага по исследованию эффективности ЦЛЗ. Следующий шаг — изучение структуры турбулентных движений воздуха в открытой шахте в условиях свободного теплообмена и массообмена между помещением шахты и атмосферой.

ЦЛЗ находится недалеко от Базового экспериментального комплекса (БЭК) ИОА СО РАН (г. Томск), поэтому исследования процессов формирования турбулентности над территорией БЭК позволяют определить благоприятные условия для оптических наблюдений в ЦЛЗ. БЭК представляет собой расположенную вдалеке от строений открытую ровную площадку площадью более 30 га с естественным травяным покровом. Измерения на территории БЭК проводились в основном вблизи поверхности.

В спектре флуктуаций температуры (рис. 8) инерционный интервал описывается асимптотикой с $5/3$ -степенной зависимостью, что соответствует колмогоровской турбулентности.

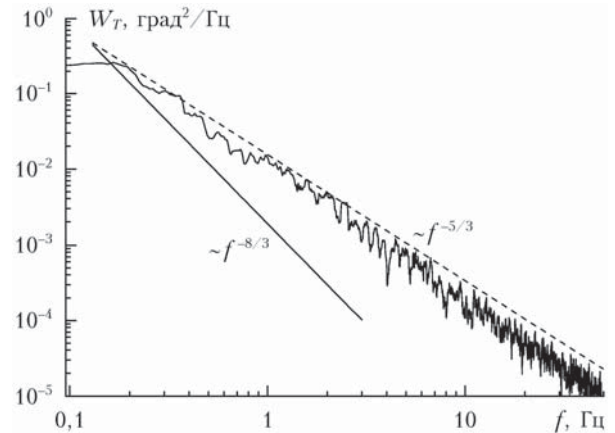


Рис. 8. Экспериментальный временной частотный спектр флуктуаций температуры. БЭК, вблизи поверхности, 1.08.2013 г.

В целом по результатам многочисленных многолетних измерений на территории БЭК регистрируется преимущественно колмогоровская турбулентность.

2.4. Специальная астрофизическая обсерватория

Результаты исследований процессов формирования турбулентности в САО РАН опубликованы в работах [92, 93, 95, 110, 111, 121]. Обсерватория расположена на Северном Кавказе в пос. Нижний Архыз (Карачаево-Черкесская Республика, Россия). Большой телескоп азимутальный (БТА) САО

находится на вершине горы Семиродники на высоте около 2070 м над ур. м.

Авторами настоящей статьи проведено исследование локальной структуры атмосферной турбулентности, включающей когерентную и колмогоровскую турбулентность. Проведены измерения суточного хода (долговременные ряды наблюдений) характеристик астроклимата на метеорологической вышке на площадке вблизи башни БТА в 2012 и в 2016 гг.

Для регистрации параметров атмосферной турбулентности с целью выяснения условий возникновения областей когерентной турбулентности над территорией обсерватории использовались мобильные ультразвуковые метеосистемы «АМК-03» в 2012 г. и «Метео-2» в 2016 г. Метеосистемы устанавливались на 20-метровой метеорологической вышке, находящейся на площадке вблизи телескопа в 24 м к юго-западу от башни БТА на краю ущелья. Высота центров измерительных головок от подстилающей поверхности составила 22,5 м. Измерения в 2016 г. проводились с 30 июля по 7 августа в стабильных условиях (ясное небо утром и днем и обычно дождь после 17:00). Средняя температура в измерениях на вышке с 1 по 4 августа (во время одновременных подкупольных измерений) была достаточно стабильна и изменялась от 11 до 15 °С. В измерениях с 26.10 по 1.11.2012 г. температура колебалась в более широком интервале, от 5–13 °С.

В измерениях на метеовышке в 2016 г. (рис. 9) подтвердилось зарегистрированное ранее нами в 2012 г. (рис. 10) присутствие над территорией САО когерентной турбулентности, при которой, как известно [3, 94–97], улучшается качество астрономических изображений.

Ущелья и реки в районе горы БТА имеют протяженность вдоль линии с юго-запада на северо-восток поперек Кавказского хребта, т.е. создают «русло» для воздушных масс в приземном слое атмосферы. Потоки воздуха на небольших высотах испытывают влияние рельефа и могут иметь соответствующее направление. Юго-западнее находится Черное море, имеющее другую температуру поверхности, чем горы. Поскольку БТА расположен на противоположном морю склоне Северного Кавказа, то направление ветра здесь может оказаться противоположным бризовым ветрам на берегу моря. Причина возникающих ветров — температурный контраст (разность температур) между горным хребтом Кавказа и Ставропольской возвышенностью. Летними ночами горы остывают быстрее долины, а днем при ясном небе северо-восточный склон Кавказа быстрее нагревается, и возникающий вдоль юго-западного направления температурный градиент приводит к появлению ветров, аналогичных бризовым. Подобный механизм горно-долинной циркуляции для САО описан в [122]. Нами зарегистрировано направление преимущественных ветров вдоль указанной линии. В наблюдательное время ночью над БТА может образовываться вихревая когерентная структура: при юго-западном ветре — в 90% измерений; при юго-восточном — в 75%; днем при ветре со Ставропольской возвышенности — в 50%.

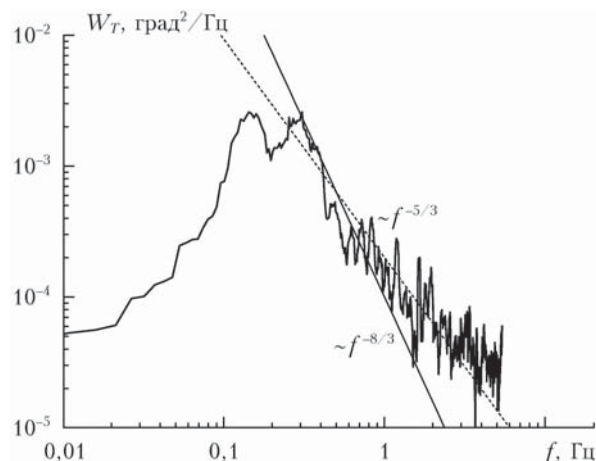


Рис. 9. Временной частотный спектр флуктуаций температуры на метеовышке. САО, 7.08.2016 г.

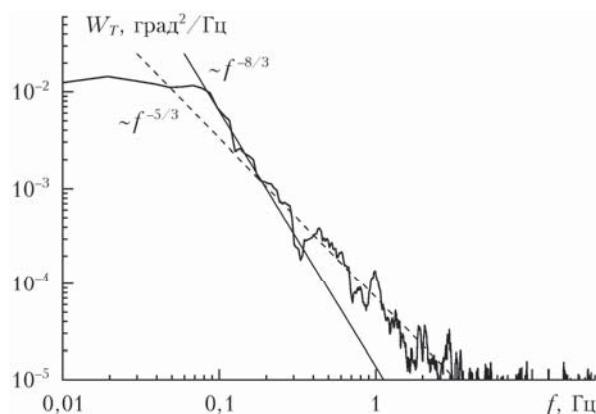


Рис. 10. Временной частотный спектр флуктуаций температуры на метеовышке. САО, 26.10.2012 г.

Таким образом, в результате исследований 2016 г. для изучаемого географического региона обсерватории САО получены следующие основные результаты: общий уровень зарегистрированных флуктуаций температуры (интенсивность турбулентности) в ночное наблюдательное время на площадке БТА в среднем низок, что обеспечивает высокое качество астрономических изображений в ночных наблюдениях на БТА. Кроме того, зарегистрировано присутствие над территорией обсерватории когерентной турбулентности, в которой улучшается качество изображения. Выяснено влияние типа подстилающей поверхности и направления скорости ветра на режим возникновения когерентной турбулентности, причинами появления которой являются горный рельеф и неравномерность нагрева подстилающей поверхности.

Астрономические наблюдения в САО можно рекомендовать производить ночью и днем, а не утром или вечером. Качество ночных или дневных изображений (звезд или Солнца) при этом будет лучше, чем качество утренних и вечерних (Солнца). Это существенная рекомендация для звездных наблюдений на БТА. Однако БТА предназначен именно для ночных наблюдений, поэтому с точки зрения влияния летней турбулентности на изображения

можно считать, что БТА установлен в оптимальном месте. Несмотря на то что БТА введен в эксплуатацию более 40 лет назад, **он до сих пор остается одним из крупнейших в мире наземных телескопов.** Стоимость строительства таких телескопов измеряется миллиардами долларов. Оно включает в себя также подготовительные исследования по выбору оптимального места размещения телескопа. Как видно, наши рекомендации, выработанные другими независимыми (метеорологическими) методами, подтверждают результативность ранее выполненных на БТА подготовительных работ.

Далее отдельно рассмотрим *подкупольное пространство БТА (САО).* Измерения выполнены нами на БТА с 22 по 31.10.2012 г. Для измерений использовалась ультразвуковая метеостанция «Метео-2». Результаты измерений показали, что в подкупольном пространстве БТА САО в 2012 г. наблюдались два крупных вихря с вертикальными осями вращения и максимальными диаметрами около 16 м [78, 121]. В точках измерений спектр флуктуаций температуры в инерционном интервале имел $8/3$ -степенное убывание (когерентная турбулентность). Спектры становились колмогоровскими ($5/3$ -степенное убывание) только при измерениях непосредственно в открытой щели купола телескопа.

Исследование распределения скоростей внутри вихря показывает, что возникающую когерентную структуру можно интерпретировать как аналог ячейки Бенара с двумя крупными вихрями, наибольший диаметр каждого из которых около 16 м. Ячейка распадается на более мелкие вихри. Диаметр наиболее энергонесущего мелкомасштабного вихря при этом составляет около 2 м. Впервые одна («чистая») когерентная структура практически без примесей других структур наблюдалась авторами настоящей статьи на Байкале (БАО) в спектрографе БСВТ в 2007 г. [74, 75]. Результаты наших измерений на БТА также показывают существование одной «чистой» когерентной структуры, но уже с другими параметрами. Параметры когерентной структуры на БТА существенно отличаются от таковых на БСВТ. Например, средняя скорость движения воздуха внутри структуры на БТА в 2012 г. достигала 1 м/с, а на БСВТ — 0,1 м/с. Как и на БСВТ [74, 75], в подкупольном пространстве БТА обнаружена шахматная структура распределения средней температуры. При открытом куполе перед главным зеркалом БТА наблюдается максимум интенсивности турбулентности (максимум C_n^2).

Результаты проведенного нами численного моделирования для данных измерений 2012 г. подтвердили экспериментальные данные. Они также показали, что в закрытом воздушном объеме БТА наблюдаются два крупных вихря с вертикальными осями вращения, когерентный распад которых порождает когерентную турбулентность (рис. 11).

С 30.07 по 7.08.2016 г. в САО были продолжены экспериментальные исследования астроклимата и исследования когерентной турбулентности, аналогичные проведенным нами в САО в октябре 2012 г. Для этого по всему объему подкупольного

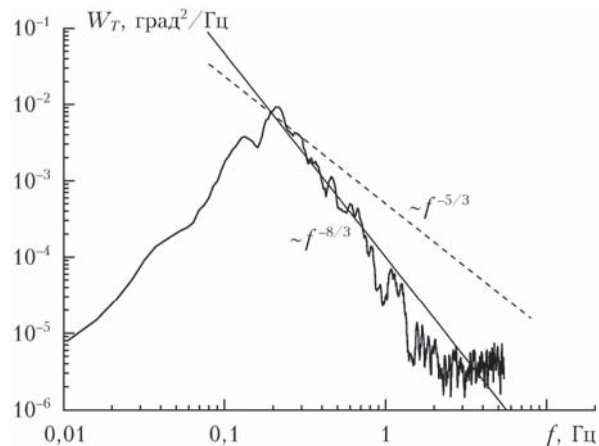


Рис. 11. Типичный спектр температуры под закрытым куполом телескопа БТА, 29.10.2012 г. Когерентная турбулентность (инерционный интервал $W_T \sim f^{-8/3}$)

специализированного помещения БТА выполнены измерения параметров астроклимата с использованием ультразвуковой метеостанции «АМК-03», крепившейся к подвижным конструкциям телескопа и купола. Для измерений температуры и размеров конструкций телескопа и купола использовались лазерные термометр и дальномер. Одновременно с подкупольными измерениями состояние атмосферы вне телескопа контролировалось ультразвуковой метеосистемой «Метео-2», установленной на 20-метровой метеорологической вышке на площадке вблизи башни БТА. Измерения проводились в стабильных условиях: при ясном небе утром и днем и традиционном дожде (обычно после 17:00).

Измерения параметров подкупольного астроклимата БТА при закрытом и открытом куполе проведены 01–04.08.2016 г. Измерения показали, что средняя температура воздуха растет от пола до верха купола на 2–3 °С (по высоте). Скорость среднего ветра при закрытом куполе достигает 0,1 м/с. Все зарегистрированные за время экспедиции спектры флуктуаций температуры при закрытом куполе соответствуют когерентной турбулентности (рис. 12).

По результатам измерений 2016 г. по объему подкупольного пространства БТА восстановлена экспериментальная картина движений воздушных потоков и подтверждено присутствие вихревой когерентной структуры. В целом зарегистрированные воздушные потоки образуют один осесимметричный вихрь с вертикальной осью. Зарегистрированная летом 2016 г. картина движений воздушной среды отличается от картины осени 2012 г. из-за различных метеоситуаций во время измерений.

Результаты численного решения краевой задачи [121], выполненного в 2017 г., с граничными условиями из экспериментальных измерений 2016 г. подтверждают существование в воздухе под куполом БТА когерентной структуры (рис. 12) и согласуются с результатами 2016 г. Установлены условия [121], при которых происходит переход от двух осесимметричных вихрей с вертикальными осями (2012 г.) к одному (2016 г.).

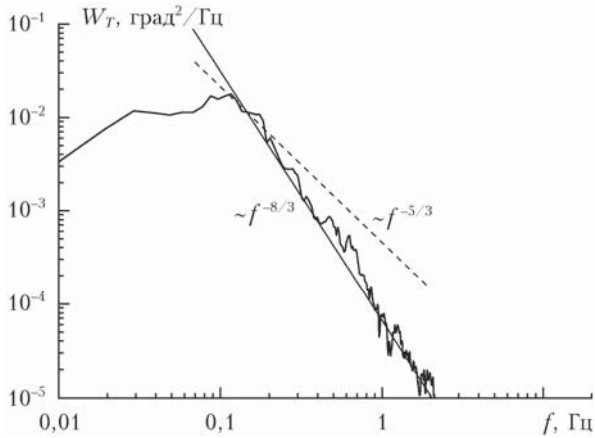


Рис. 12. Типичный спектр температуры под закрытым куполом телескопа БТА, 3.08.2016 г. Когерентная турбулентность (инерционный интервал $W_T \sim f^{-8/3}$)

Численное моделирование позволяет выполнить анализ влияния конструктивных особенностей и температурных режимов элементов телескопа, а также тестирование оптических характеристик телескопа, включая минимизацию влияния внешней и подкупольной турбулентности.

2.5. Обсерватория Колыванского хребта

Результаты исследований процессов формирования турбулентности в ОКХ опубликованы в работах [3, 95, 101, 115, 116].

Обсерватория расположена в предгорьях Колыванского хребта Алтайского края. Ее территория представляет собой местность с холмами от десятков до нескольких сотен метров высотой. В период наблюдений регистрировались достаточно высокие значения скорости среднего ветра (обычно более 3 м/с). Установлено присутствие над территорией обсерватории областей когерентной турбулентности (несколько достаточно крупных когерентных структур), причинами формирования которых являются рельеф местности и неравномерность нагрева подстилающей поверхности. На рис. 13, 14 приведены примеры временных частотных спектров флуктуаций температуры, полученных в измерениях на территории обсерватории.

В спектрах флуктуаций температуры начальный участок инерционного интервала, в котором происходит убывание спектра минимум на порядок (и по которому в первую очередь определяется тип наблюдаемой турбулентности), описывается асимптотиками с $8/3$ - либо $12/3$ -степенной зависимостью, что соответствует когерентной турбулентности.

3. Результат систематизации исследований локальной структуры турбулентности

В итоговой сводной таблице указаны преимущественные типы и условия формирования турбулент-

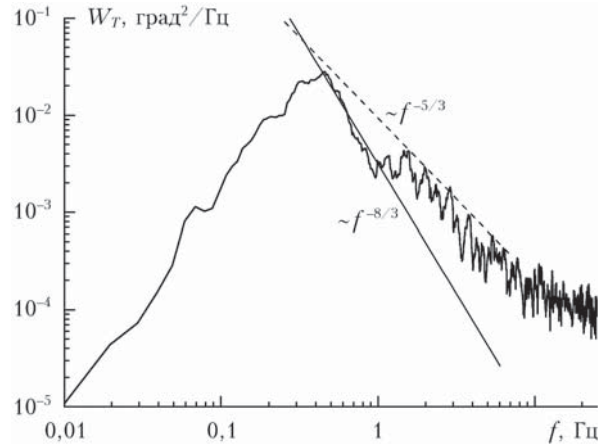


Рис. 13. Временной частотный спектр флуктуаций температуры. Когерентная турбулентность (инерционный интервал $W_T \sim f^{-8/3}$), ОКХ, около сопки, день 28.06.2006 г.

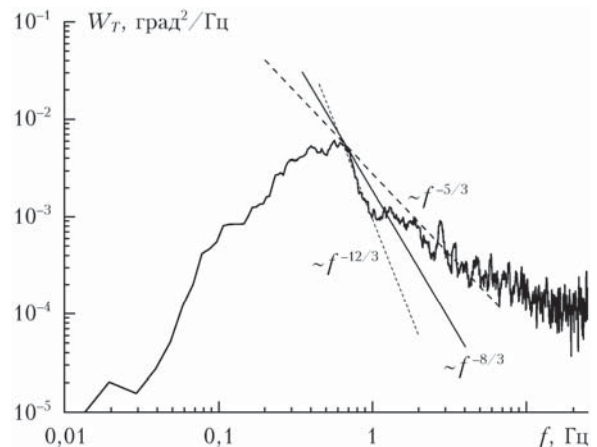


Рис. 14. Временной частотный спектр флуктуаций температуры. Когерентная турбулентность (инерционный интервал $W_T \sim f^{-12/3}$), ОКХ, около озера, день 28.06.2006 г.

ности в исследованных российских обсерваториях (ССО, БАО, ОКХ, САО, ЦЛЗ). Таблица построена по результатам автоматизированного компьютерного анализа более 8300 спектров турбулентных флуктуаций температуры, зарегистрированных в указанных обсерваториях.

Как видно из сопоставления преимущественных направлений ветров в обсерваториях и типов подстилающих поверхностей в окрестностях телескопов, над территориями обсерваторий вблизи телескопов формируется долгоживущая область когерентной турбулентности при условиях, когда направленные в сторону телескопа воздушные потоки (ветер), пересекая горный хребт или глубокую впадину, испытывают вертикальное закручивание с образованием крупных стабильных воздушных вихрей (когерентных структур), которые переносятся воздушными потоками далее к телескопу. При перемене направления ветра (или существенном его ослаблении) либо в случаях, когда ветер дует на телескоп в основном со стороны плоскогорья или равнины, в этих же обсерваториях, как правило, формируется колмогоровская турбулентность.

Условия формирования и преимущественные типы турбулентности в исследованных российских обсерваториях

Обсерватория				Преимущественный ветер			Преимущественный тип турбулентности ▲ — когерентная ○ — колмогоровская
Название	Место расположения	Высота над ур. м., м	Виды рельефа в направлении С—Ю	Направление ветра	Особенности рельефа вдоль направления	Высоты*, м	
Саянская солнечная обсерватория	Респ. Бурятия, пос. Монды, гора Часовые Сопки	2000	хребет— впадина— гора — равнина— озеро	↙ СВ	хр. Восточный Саян, Мондинская впадина	2900, 1300	▲
				↗ ЮЗ	оз. Хубсугул	1640	○
				—	плато	1640—2200	○
Байкальская астрофизическая обсерватория	Иркутская обл., пос. Листвянка	650	впадина— хребет— гора — озеро— хребет	↓ С	Предбайкальская впадина, Приморский хр.	520—600 650—850	▲
				↑ Ю	оз. Байкал, хр. Хамар-Дабан	450, 1200—1800	▲
				—	горы, впадины	—	○
Обсерватория Кольванского хребта	Алтайский край	340	равнина— предгорье — хребет	↑ Ю	Кольванский хр.	350—540	▲
				—	Предалтайская равнина	200—250	○
Специальная астрофизическая обсерватория	Карачаево-Черкесия, пос. Нижний Архыз, гора Семиродники	2070	равнина— гора — хребет	↓ С	Ставропольская возвышенность	300—500	▲
				↗ ЮЗ	ущелье р. Б. Зеленчук, Кавказский хр.	1250—2000	▲
				↖ ЮВ	ущелье р. Маруха, Кавказский хр.	1650—2100	▲
				—	Кавказский хр.	—	○
Центр лазерного зондирования	Томская обл., г. Томск	170	равнина	—	Западно-Сибирская равнина	100—200	○

* Характерные высоты особенностей рельефа вдоль выделенного направления ветра.

Поскольку в условиях когерентной турбулентности астрономические изображения улучшаются [3, 94—97], то приведенные в таблице результаты могут определять оптимальные условия и сроки проведения астрономических наблюдений в указанных обсерваториях.

Заключение

Таким образом, основные результаты исследований локальной структуры турбулентности в каждом из географических регионов, где расположены обсерватории (ССО, БАО, ОКХ, САО, ЦЛЗ), а также результаты исследований процессов формирования турбулентности в подкупольных пространствах крупных астрономических приемников (БСВТ, БТА, ЦЛЗ) следующие.

1. Над территориями рассмотренных обсерваторий юга Сибири и Северного Кавказа установлено присутствие областей когерентной (неколмогоровской) турбулентности, в которых преобладает влияние одной крупной когерентной структуры. Показано, что причиной формирования когерентной турбулентности является рельеф местности, определяющий направления скорости ветра, а также неравномерность нагрева подстилающей поверхности. Полученные результаты могут определять оптимальные условия и сроки проведения астрономических наблюдений в указанных обсерваториях.

2. Когерентная турбулентность над территориями обсерваторий возникает, если дующий на телескоп ветер пересекает перед этим либо горный хребет, либо глубокую впадину (глубокую долину, ущелье). В этом случае происходят сильное вертикальное закручивание воздушных потоков и образование крупных стабильных воздушных вихрей (когерентных структур). В других ситуациях, когда ветер дует на телескоп в основном со стороны плоскогорья или равнины, обычно формируется колмогоровская турбулентность.

3. Установлено присутствие в подкупольных специализированных помещениях крупных вихревых когерентных структур, а значит, когерентной турбулентности. Когерентная турбулентность, по сравнению с колмогоровской, обеднена мелкомасштабными неоднородностями, поэтому в таких помещениях можно ожидать ослабления фазовых флуктуаций оптического излучения и, следовательно, улучшения оптических изображений.

4. Численное решение краевых задач с граничными условиями из экспериментальных измерений с использованием методов конструктивной геометрии и визуализация движений воздушной среды (поля скоростей и завихренности) позволяют: выполнить анализ влияния конструктивных особенностей самих астрономических телескопов, форм купольных конструкций и заполнения подкупольного пространства сложной геометрии, а также температурных режимов

оптических элементов телескопа и подкупольного пространства (в том числе учесть суточный и сезонный ход температур) на качество формируемых телескопом изображений; восстановить распределение параметров турбулентности на рабочих участках подкупольного помещения, что в совокупности делает возможным тестирование в стационарных условиях оптических характеристик как уже действующих, так и проектируемых телескопов, включая минимизацию влияния внешней и подкупольной турбулентности.

1. *Гурьянов А.Э.* О пульсациях температуры в воздушной среде вблизи телескопа ночью // Тр. Всесоюз. конф. рабочей группы «Астроклимат» Астросовета АН СССР (Абастумани, 1981). Астроклимат и эффективность телескопов. Л.: Наука, 1984. С. 164–168.
2. *Tokovinin A.* Where is the surface-layer turbulence? // Proc. SPIE. 2010. V. 7733. P. 77331N.
3. *Носов В.В., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Оптические свойства турбулентности в горном пограничном слое атмосферы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 153 с.
4. *Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
5. *Лукин В.П.* Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
6. *Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В.* Атмосферная оптика. Т. 5. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 271 с.
7. *Банах В.А., Белов В.В., Землянов А.А., Креков Г.М., Лукин В.П., Матвиенко Г.Г., Носов В.В., Суханов А.Я., Фалиц А.В.* Распространение оптических волн в неоднородных, случайных, нелинейных средах. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 402 с.
8. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. Т. 1. 696 с.
9. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. Т. 2. 742 с.
10. *Колмогоров А.Н.* Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // ДАН СССР. 1941. Т. 30, № 4. С. 299–303.
11. *Колмогоров А.Н.* Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1942. Т. 6, № 1–2. С. 56–58.
12. *Hagen G.* Über die Bewegung des Wassers in cylindrischen, nahe horizontalen Leitungen // Abh. Akad. Wiss. Berlin, 1869. S. 1–29.
13. *Reynolds O.* An Experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels // Proc. Roy. Soc. 1883. V. 35. P. 84–99.
14. *Benard H.* Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide // Rev. Gen. Sci. Pure Appl. 1900. V. 11. P. 1261–1271, 1309–1328.
15. *Prandtl L.* Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung // III. Internationalen Mathematiker-Kongresses, Heidelberg 1904. Leipzig: Teubner, 1905. P. 484–491.
16. *Taylor G.I.* Statistical theory of turbulence. Parts I–IV // Proc. Roy. Soc. 1935. A151, N 874. P. 421–478; Part V // Proc. Roy. Soc. 1936. A156, N 888. P. 307–317.
17. *Пинус Н.З., Шур Г.Н.* Экспериментальные исследования когерентной структуры турбулентных течений в нижней тропосфере // Метеорол. и гидрол. 1989. № 5. С. 19–24.
18. *Rayleigh Lord.* On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side // Phil. Mag. 1916. V. 32, ser. 6. P. 529–546.
19. *Richardson L.* Weather Prediction by Numerical Process. Cambridge: The University Press, 1922. 262 p.
20. *Karman T., Howarth L.* On the statistical theory of isotropic turbulence // Proc. R. Soc. A. 1938. V. 164. P. 192–215.
21. *Обухов А.М.* Турбулентность в температурно-неоднородной атмосфере // Тр. Ин-та теорет. геофиз. АН СССР. 1946. Т. 1. С. 95–115.
22. *Монин А.С.* Динамическая турбулентность в атмосфере // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1950. Т. 14, № 3. С. 232–254.
23. *Монин А.С.* О механизме нагревания воздуха в открытой степи // Микроклиматические и климатические исследования в Прикаспийской низменности. М.: Изд-во АН СССР, 1953. С. 100–123.
24. *Макаров В.Ф., Шур Г.Н.* Некоторые особенности структуры турбулентности ясного неба в горных районах // Тр. центр. аэролог. обсерватории. 1973. Вып. 112. С. 91–97.
25. *Nosov V.V., Lukin V.P., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G.* Result of measurements of the astroclimate characteristics of astronomical telescopes in the mountain observatories // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-11. P. 82–87.
26. *Nosov V.V., Lukin V.P., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G.* Astroclimate parameters of the surface layer in the Sayan solar observatory // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-12. P. 87–94.
27. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентная турбулентность на территории Байкальской астрофизической обсерватории // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 204–205.
28. *Носов В.В., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Торгаев А.В.* Атмосферная когерентная турбулентность // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 753–759; *Nosov V.V., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Torgaev A.V.* Atmospheric coherent turbulence // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 3. P. 201–206.
29. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентная турбулентность вблизи приемной апертуры астрономического телескопа // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 212–214.
30. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентные структуры в турбулентной атмосфере. Эксперимент и теория // Солнечно-земная физика. 2009. Вып. 14. С. 97–113.
31. *Монин А.С.* Структура атмосферной турбулентности // Теория вероятности и ее применение. 1958. Т. 3, вып. 3. С. 285–317.
32. *Frost W., Moulden T.H.* Handbook of Turbulence (V. 1: Fundamentals and Applications). New York: Plenum Press, 1977. 498 p.
33. *Седунов Ю.С., Авдюшин С.И., Борисенков Е.П., Волковицкий О.А., Петров Н.Н., Рейтенбах Р.Г., Смирнов В.И., Черников А.А.* Атмосфера: справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеоздат, 1991. 510 с.
34. *Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметтер С.М., Шур Г.Н.* Турбулентность в свободной атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 286 с.
35. *Гиневский А.С., Власов Е.В.* Когерентные структуры в турбулентных струйных течениях // Модели механики сплошной среды: сб. ст. под ред. Г.В. Гадияка. Новосибирск: СО АН СССР, Ин-т теорет. и прикл. механики, 1983. С. 91–117.

36. Кляцкин В.И. Статистический анализ когерентных явлений в стохастических динамических системах. М.: КРАСАНД, 2015. 776 с.
37. Townsend A. The structure of the turbulent boundary layer // *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.* 1951. V. 47, iss. 2. P. 375–395.
38. Townsend A.A. The structure of turbulent shear flow. Cambridge: Cambridge University Press, 1956. 429 p.
39. Batchelor G.K. The Theory of Homogeneous Turbulence. New York: Cambridge University Press, 1953. 197 p.
40. Brown G., Roshko A. On density effects and large structure in turbulent mixing layers // *J. Fluid Mech.* 1974. V. 64, N 4. P. 775–816.
41. Davies P., Yule A. Coherent structures in turbulence // *J. Fluid Mech.* 1975. V. 69. P. 513–537.
42. Michalke A., Fuchs H. On turbulence and noise of an axisymmetric shear flow // *J. Fluid Mech.* 1975. V. 70. P. 179–205.
43. Kaplan R.E., Laufer J. The intermittently turbulent region of the boundary layer // *Applied Mechanics. Proc. of 12th Intern. Congress of Applied Mechanics, 1968 / M. Hetényi, W.G. Vincenti (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, 1969. P. 236–245.*
44. Adrian R.J. On the Role of Conditional Averages in Turbulence Theory // *Conf. Proc. 4th Biennial Symp. on Turbulence in Liquids. Princeton: Science Press, 1977. 356 p.*
45. Liepmann H.W. Experimental fluid mechanics: The impact of modern instrumentation / E. Becker, G.K. Mikhailov (eds.) // *Proc. 13 Int. Congress of Theoretical and Applied Mechanics. Berlin, Heidelberg: Springer, 1973. P. 200–212.*
46. Монин А.С. О структуре полей скорости ветра и температуры в приземном слое воздуха // *Атмосферная турбулентность: сб. ст. / под ред. В.И. Татарского. Тр. ИФА АН СССР. Вып. 4. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 5–20.*
47. Воронцов П.А. Турбулентность и вертикальные токи в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 296 с.
48. Татарский В.И. Теория флуктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 232 с.
49. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
50. Бороноев В.В., Бельский М.С., Гомбоев Н.Ц., Миронов В.Л. Оптическое зондирование атмосферной турбулентности. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е, 1986. 92 с.
51. Жуковский Н.Е. О снежных заносах и заилинии рек (1919 г.) // *Полное собрание сочинений. Т. 3. Гидродинамика. М.; Л.: ОНТИ, 1936. С. 451–474*
52. Прандтль Л., Титменс О. Гидро- и аэромеханика. М.: ГИТТЛ, 1933. Т. 1. 224 с.
53. Prandtl L. Neuere Ergebnisse der Turbulenzforschung // *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. 1933. V. 77. P. 105–114.*
54. Dryden H.L. Recent advances in the mechanics of boundary layer flow // *Adv. Appl. Mech. New York: Acad. Press, 1948. V. 1. P. 1–40.*
55. Townsend A.A. Measurements in the turbulent wake of a cylinder // *Proc. Roy. Soc. A. 1947. V. 190. P. 551–561.*
56. Шур Г.Н. Спектральная структура турбулентности в свободной атмосфере по данным самолетных исследований // *Тр. ЦАО. 1964. Вып. 53. С. 43–54.*
57. Власов Е.В., Гиневский А.С., Каравосов Р.К. Прямые и косвенные методы экспериментального обнаружения когерентной структуры турбулентных струй. С. 206–219 // *Механика турбулентных потоков: сб. тр. всесоюз. конф. «Проблемы турбулентных потоков жидкости и газа». М.: Наука, 1980. 376 с.*
58. Монин А.С. Гидродинамическая неустойчивость // *Успехи физ. наук. 1986. Т. 150, вып. 1. С. 61–105.*
59. Griffiths R. The Monthly Review. 1801. V. 35. 669 p.
60. Grant R. History of Physical Astronomy from the Earliest Ages to the Middle of the Nineteenth Century. 1852. 672 p.
61. Liepmann H.W. Aspects of the turbulence problem. Part 1 // *J. Appl. Math. Phys. (ZAMP). 1952. V. 3, iss. 5. P. 321–342; Part 2 // J. Appl. Math. Phys. (ZAMP). V. 3, iss. 6. P. 407–426.*
62. Bradshaw P. The turbulence structure of equilibrium boundary layers // *J. Fluid Mech.* 1967. V. 29. P. 625–645.
63. Хлопков Ю.И., Жаров В.А., Горелов С.Л. Когерентные структуры в турбулентном пограничном слое. М.: МФТИ, 2002. 267 с.
64. Blackwelder R.F., Kovasznay L.S.G. Time scale and correlation in a turbulent boundary layer // *Phys. Fluids. 1972. V. 15. P. 1545–1554.*
65. Blackwelder R.F. Coherent structures associated with turbulent transport // *Proc. 2nd Int. Symp. “On Transport phenomena in turbulent flows”. Tokyo, 1987. P. 1–20.*
66. Perry A.E., Lim T.T., Chong M.S., Teh E.W. The fabric of turbulence // *AIAA. 1980. Paper 80–1358. 10 p.*
67. Frish U., Afonso M.M., Mazzino A., Yakhot V. Does multifractal theory of turbulence have logarithms in the scaling relations // *J. Fluid Mech.* 2005. V. 542. P. 97–103.
68. Arneodo A., Benzi R., Berg J., Biferale L., Bodenschatz E., Busse A., Calzavarini E., Castaing B., Cencini M., Chevillard L., Fisher R.T., Grauer R., Homann H., Lamb D.Q., Lanotte A.S., Lévêque E., Lüthi B., Mann J., Mordant N., Müller W., Ott S., Ouellette N.T., Pinton J.F., Pope S.B., Roux S.G., Toschi F., Xu H., Yeung P.K. Universal intermittent properties of particle trajectories in highly turbulent flows // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100. P. 254–504.
69. Holmes P., Lumley J., Berkooz G., Rowley C. Turbulence, Coherent Structures, Dynamical Systems and Symmetry. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 402 p.
70. Marov M.Ya., Kolesnichenko A.V. Turbulence and Self-Organization. Modeling Astrophysical Objects. Springer, 2013. 657 p.
71. Haller G. Lagrangian Coherent Structures // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2015. V. 47. P. 137–162.
72. Nieuwstadt F.T.M., Boersma B.J., Westerweel J. Turbulence: Introduction to theory and applications of turbulent flows. Springer, 2016. 284 p.
73. Jimenez J. Coherent structures in wall-bounded turbulence // *J. Fluid Mech.* 2018. V. 842. P. 1.
74. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Астроклимат специализированных помещений Большого солнечного вакуумного телескопа. Ч. 1 // *Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 11. С. 1013–1021.*
75. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Астроклимат специализированных помещений Большого солнечного вакуумного телескопа. Ч. 2 // *Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 3. С. 207–217.*
76. Nosov V.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Papushev P.G., Torgaev A.V. Astroclimate inside the dome of AZT-14 telescope of Sayan Solar Observatory // *Proc. SPIE. 2007. V. 69361R. P. 1–4.*
77. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G. Coherent structures in the turbulent atmosphere // *Mathematical models of non-linear phenomena, processes and systems: From molecular*

- scale to planetary atmosphere / A.B. Nadycto, L.A. Uvarova, A.V. Latyshev (eds.). New York: Nova Science Publishers. 2013. Ch. 20. P. 297–330.
78. *Nosov V.V.* Atmospheric Turbulence in the Anisotropic Boundary Layer // Optical waves and laser beams in the irregular atmosphere / N. Blaunshtein, N. Kopeika. (eds.). Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, CRC Press. 2018. Ch. 3. P. 67–180.
 79. *Patterson G.K., Zakin J.L.* Biennial Symposium on Turbulence, 5th, University of Missouri-Rolla, Rolla, Mo., October 3–5, 1977, Proceedings. VS: N.P. 1979.
 80. *Hussain A.* Coherent structures and studies of perturbed and unperturbed jets // The Role of Coherent Structures in Modelling Turbulence and Mixing. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981. V. 136. P. 252–291.
 81. *Лоїцянскій Л.Г.* Из моих воспоминаний. Записки профессора-политехника. СПб.: Б.С.К., 1998. 139 с.
 82. *Лоїцянскій Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
 83. *Колесниченко А.В., Маров М.Я.* Турбулентность и самоорганизация. Проблемы моделирования космических и природных сред. 3-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 651 с.
 84. *Гольдштик М.А., Штерн В.Н.* К теории структурной турбулентности // ДАН СССР. 1981. Т. 257, № 6. С. 1319–1322.
 85. *Гольдштик М.А.* Динамические, равновесные и поточные структуры в турбулентности // Структурная турбулентность: сб. науч. тр. / под ред. М.А. Гольдштика. Новосибирск: АН СССР, Сиб. отд.-е, Ин-т теплофизики, 1982. С. 5–12.
 86. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентные структуры в турбулентной атмосфере. Эксперимент и теория // Солнечно-земная физика. 2009. Вып. 14. С. 97–113.
 87. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Проблема когерентной турбулентности // Вестн. МГТУ «Станкин». 2013. Т. 24, № 1. С. 103–107.
 88. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Approximations of the synoptic spectra of atmospheric turbulence by sums of spectra of coherent structures // Proc. SPIE. 2016. V. 9910. P. 99101Y1–6.
 89. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентные структуры – элементарные составляющие атмосферной турбулентности // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 236–238.
 90. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G.* The solitonic hydrodynamical turbulence // Proc. VI Int. Conf. “Solitons Collapses and Turbulence: Achievements Developments and Perspectives”. Novosibirsk, 2012. P. 108–109.
 91. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентные составляющие турбулентности: тез. докл. междунар. конф., посвящ. памяти акад. А.М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». I. Турбулентность. М.: ГЕОС, 2013. С. 43–47.
 92. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Когерентные составляющие синоптических спектров атмосферной турбулентности // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 8, № 8/3. С. 206–209.
 93. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Моделирование когерентных структур (топологических солитонов) в закрытых помещениях путем численного решения уравнений гидродинамики // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 120–133.
 94. *Lukin V.P., Bolbasova L.A., Nosov V.V.* Comparison of Kolmogorov’s and coherent turbulence // Appl. Opt. 2014. V. 53, N 10. P. B231–B236.
 95. *Лукин В.П., Носов В.В., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Причины проявления неколмогоровской турбулентности в атмосфере // Успехи современного естествознания. 2014. № 12. С. 369–377.
 96. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1099–1110.
 97. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Оптимальное размещение наземных коротковолновых приемников атмосферных телекоммуникационных систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 3. С. 76–82.
 98. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Практические рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 18. С. 86–97.
 99. *Азбукин А.А., Бозуевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д.* Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорол. и гидрол. 2006. № 11. С. 89–97.
 100. *Popinet S.* The Gerris Flow Solver. A free, open source, general-purpose fluid mechanics code. 2001–2015. URL: <http://gfs.sf.net> (last access: 3.10.2018).
 101. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Causes of non-Kolmogorov turbulence in the atmosphere // Appl. Opt. 2016. V. 55, N 12. P. B163–B168.
 102. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Results of measurements of A.N. Kolmogorov and A.M. Obukhov constants in the Kolmogorov–Obukhov law // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-09. P. 70–77.
 103. *Nosov V.V., Lukin V.P., Torgaev A.V.* Structure function of temperature fluctuations in coherent turbulence // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-13. P. 94–97.
 104. *Nosov V.V., Lukin V.P., Torgaev A.V.* Decrease of the light wave fluctuations in the coherent turbulence // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-10. P. 77–82.
 105. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Флуктуации астрономических изображений в когерентной турбулентности // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 223–225.
 106. *Nosov V.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Intermittency of the astronomical images jitter in the high-mountain observations // Proc. SPIE. 2014. V. 9292. P. 92920V1–4.
 107. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Панушев П.Г., Торгаев А.В.* Результаты измерений астроклиматических характеристик подкулольного пространства телескопа АЗТ-33 Саянской солнечной обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН // Солнечно-земная физика. 2006. Вып. 9. С. 1–103.
 108. *Lukin V.P., Nosov V.V., Torgaev A.V.* Features of optical image jitter in a random medium with a finite outer scale // Appl. Opt. 2014. V. 53, N 10. P. B196–B204.
 109. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Эффект перемежаемости турбулентности в высокогорных наблюдениях // Изв. вузов. Физика. 2015. № 8/3. С. 210–213.
 110. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Структура движений воздуха на оптических трассах в специализированных помещениях астрономических телескопов. Численное моделирование // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 7. С. 614–621.
 111. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Структура турбулентности на специализированных оптических трассах в астрономических телескопах // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59, № 12/2. С. 134–137.

112. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Временная перемежаемость дисперсии дрожания астрономических изображений // Тр. III Всерос. науч.-конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». СПб.: Военно-косм. акад. им. А.Ф. Можайского, 2014. Т. 1. С. 292–297.
113. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Структура турбулентности над неоднородно нагретыми поверхностями. Численное моделирование // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 8/3. С. 187–190.
114. Носов В.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Носов Е.В. Полуэмпирические гипотезы теории турбулентности в анизотропном пограничном слое // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 10. С. 845–863.
115. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Турбулентные масштабы теории подобия Мони́на–Обухова в анизотропном пограничном слое // Междунар. конф., посвящ. памяти акад. А.М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». I. Турбулентность. М.: ГЕОС, 2013. С. 38–43.
116. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Турбулентные масштабы скорости и температуры в атмосферном пограничном слое // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 8/3. С. 331–333.
117. Brandt P.N. Frequency spectra of solar image motion // Solar Phys. 1969. V. 7. P. 187–203.
118. Ковадло П.Г., Иванов В.И., Дарчия Ш.П. Фотоэлектрический регистратор дрожания изображения Солнца // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1975. Вып. 37. С. 196–202.
119. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Структура турбулентных движений воздуха в шахте главного зеркала Сибирской лидарной станции ИОА СО РАН. Эксперимент и численное моделирование // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 905–910.
120. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Turbulence and heat exchange inside the dome room of lidar station. Experiment and simulation // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 754, N 2. P. 022008-1–6.
121. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В., Афанасьев В.Л., Балега Ю.Ю., Власюк В.В., Панчук В.Е., Якопов Г.В. Исследования астроклимата в Специальной астрофизической обсерватории РАН // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 8. С. 616–627.
122. Панчук В.Е., Афанасьев В.Л. Астроклимат Северного Кавказа – мифы и реальность // Астрофиз. бюллетень. 2011. Т. 66, № 2. С. 253–274.

V.V. Nosov, V.P. Lukin, E.V. Nosov, A.V. Torgaev. The turbulence formation at astronomical observatories of the Southern Siberia and the North Caucasus.

Main characteristics of the astroclimate (the turbulent fields structure and the formation conditions) are studied in a number of Russian astronomical observatories in the Southern Siberia and the North Caucasus: Sayan Solar, Baikal Astrophysical, Special Astrophysical, Kolyvansky Ridge Observatory, Center of Laser Atmosphere Sensing of V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS. The experimental results have been received from long-term astroclimate observations (expeditions in 2006–2017) using a small-sized ultrasonic weather station; and theoretical results, from the numerical solution of various boundary problems for the Navier–Stokes equations. Presence of regions with coherent (non-Kolmogorov) turbulence over the observatories has been established, the formation of which is caused by the terrain and the uneven heating of the underlying surface. Large vortical coherent structures and coherent turbulence have been registered inside dome rooms. Numerical simulation allows us to analyze of the influence of design features and temperature regimes of the telescope elements, as well as to test the telescope optical characteristics, including the minimization of the influence of external and under-dome turbulence. The paper has the character of a review of the authors' own researches. The introduction contains a brief historical overview of the origin and evolution of the "coherent structure" and "coherent turbulence" concepts based on the world scientific literature.