

## Переменяемость колмогоровской и когерентной турбулентности в горном пограничном слое (обзор)

В.В. Носов<sup>1</sup>, В.П. Лукин<sup>1</sup>, П.Г. Ковадло<sup>2</sup>, Е.В. Носов<sup>1</sup>, А.В. Торгаев<sup>1\*</sup>

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

<sup>2</sup> *Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а*

Поступила в редакцию 4.06.2021 г.

Настоящий обзор посвящен переменяемости атмосферной турбулентности разных типов (колмогоровской и когерентной) в горном пограничном слое. Сделан краткий обзор мировой научной литературы по видам переменяемости турбулентности для лучшего понимания места, которое занимает среди них переменяемость разных типов. В связи с имеющимися в литературе различными толкованиями понятия когерентной турбулентности дополнены сделанные ранее авторами обзоры мировой научной литературы по когерентной турбулентности и когерентным структурам, в которых описаны механизмы появления (формирования) когерентной турбулентности и ее ключевые свойства, а также указаны связи и различия между когерентной и колмогоровской турбулентностью. К итогу обзоров можно отнести обсуждение современного научного представления о структуре турбулентности. Так, авторами настоящей статьи ранее (2008–2019) независимо было показано, что атмосферную турбулентность можно рассматривать как некогерентную смесь различных когерентных структур. Вместе с тем существует гипотеза Э. Хопфа (1948) о конечномерности аттракторов в фазовом пространстве решений уравнений Навье–Стокса. Физической расшифровкой этой гипотезы, как указывали А.С. Монин и А.М. Яглом (1991, 1992), является представление о структуре турбулентности как о пространственно-временном хаосе конечного числа взаимодействующих когерентных структур. Из сравнения указанных представлений видно, что результаты авторов фактически являются доказательством гипотезы Э. Хопфа в ее интерпретации, сформулированной А.С. Мониним и А.М. Ягломом. При этом «хаос» турбулентности является в значительной степени детерминированным.

Обзорные результаты исследования переменяемости турбулентности разных типов – итог многолетних экспериментальных исследований турбулентности акустическими и оптическими методами, выполненных авторами в высокогорных астрономических обсерваториях. Приведены зарегистрированные в оптико-метеорологических измерениях времена жизни турбулентности разного типа: колмогоровской и когерентной. Показано, что эффект переменяемости типов турбулентности характеризует локальную структуру турбулентности над регионом размещения обсерваторий и позволяет выработать практические рекомендации относительно наиболее благоприятного режима проведения наблюдений в астрономических обсерваториях.

*Ключевые слова:* переменяемость турбулентности, когерентная турбулентность, когерентная структура, спектр когерентной турбулентности, спектр когерентной структуры, связь колмогоровской и когерентной турбулентности; intermittency of turbulence, coherent turbulence, coherent structure, coherent turbulence spectrum, coherent structure spectrum, Kolmogorov and coherent turbulence relationship.

### Введение

Свойства турбулентной атмосферы оказывают существенное влияние на результаты исследований в области оптики атмосферы. Поэтому корректное задание турбулентных характеристик атмосферы является важной предпосылкой для точного прогноза результатов распространения коротковолнового (оптического) излучения в атмосфере.

Как известно [1–4], теория турбулентности исходит из описания течений жидкостей и газов на основе уравнений гидродинамики. В связи с чрезвычайной

сложностью индивидуального описания турбулентных гидродинамических полей для описания турбулентных течений вынужденно применяются статистические методы.

Полное статистическое описание случайных гидродинамических полей дается характеристическим функционалом [2, 4]. Он содержит информацию о бесконечной совокупности моментов полей и удовлетворяет динамическим уравнениям с функциональными (вариационными) производными. Приемлемых методов решения таких уравнений в настоящее время не существует. Поэтому статистические исследования в теории турбулентности по традиции опираются на систему уравнений О. Рейнольдса (O. Reynolds) [5] (также называемую системой уравнений Келлера–Фридмана [6]), являющуюся результатом осреднения уравнений гидродинамики.

\* Виктор Викторович Носов (Nosov@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Павел Гаврилович Ковадло (kovadlo2006@rambler.ru); Евгений Викторович Носов (nev@iao.ru); Андрей Витальевич Торгаев (Torgaev@iao.ru).

Однако в этой системе число неизвестных превосходит число уравнений (система не замкнута). Замыкание системы обычно производится путем задания некоторых соотношений между моментами гидродинамических полей. Указанные соотношения, найденные из экспериментов или полученные из физических соображений (например, из соображений размерности), носят название полуэмпирических гипотез теории турбулентности, а соответствующие теории называются полуэмпирическими теориями турбулентности. Можно сказать, что большинство научных работ по статистической динамике турбулентных течений посвящалось и посвящается способам преодоления трудностей, связанных с проблемой замыкания. Полностью преодолеть эти трудности до сих пор еще не удалось.

В то же время для многих практических задач достаточно определить лишь статистические моменты низших порядков. Исследование таких моментов позволило получить много важных результатов в теории турбулентности. Так, например, показано, что в отличие от крупномасштабных характеристик турбулентности, которые существенно зависят от геометрии потока и характера внешних воздействий, мелкомасштабные при больших числах Рейнольдса имеют в значительной мере универсальный характер. Это позволило сформулировать известный и важный закон Колмогорова—Обухова [1—4].

Вместе с тем информации, которую можно получить из исследования статистических моментов низших порядков, не хватает для выяснения физических механизмов возникновения турбулентности. Также статистические методы дают мало информации для выяснения вопросов внутреннего строения турбулентности (вопросы о внутренней или локальной структуре турбулентности), важных для понимания этого физического явления.

В то же время можно говорить о локальной структуре ламинарных течений и течений, близких к ламинарным. Для исследования локальной структуры таких течений можно использовать нестатистические аналитические методы. Можно, например, говорить о локальной структуре крупномасштабных упорядоченных вихрей. Такие вихри часто наблюдаются в атмосфере. Они обладают интересными свойствами и обычно называются когерентными структурами [3, 4].

Вопросы о локальной структуре турбулентности оказываются во многом связанными с явлениями перемежаемости турбулентности. Ниже будет показано, что под перемежаемостью турбулентности обычно понимается смена (пространственно-временное чередование, прерывистость) каких-либо характеристик турбулентности, происходящая с различной регулярностью (периодичностью).

Настоящая работа посвящена исследованию перемежаемости колмогоровской и когерентной турбулентности в горном пограничном слое.

Колмогоровская и когерентная турбулентности относятся к турбулентностям разных типов. Поэтому можно сказать, что в статье выполнено исследование

перемежаемости атмосферной турбулентности разных типов.

Для лучшего понимания места перемежаемости турбулентности разных типов среди других видов перемежаемости турбулентности в разд. 1 представлен краткий обзор мировой научной литературы по видам перемежаемости турбулентности. Его можно считать дополнением к обзорным данным о перемежаемости турбулентности, приведенным в монографиях [1—4].

В связи с имеющимися в мировой научной литературе различными толкованиями понятия когерентной турбулентности, а также в связи с тем, что этот термин пока недостаточно широко распространен, в разд. 2 дополнены наши краткие обзоры [7, 8] мировой научной литературы по когерентной турбулентности и когерентным структурам (так как понятие когерентной турбулентности напрямую связано с понятием когерентной структуры). В этих обзорах описаны механизмы появления (формирования) когерентной турбулентности и ключевые свойства когерентной турбулентности, а также указаны связи и различия между когерентной и колмогоровской турбулентностью.

Отметим, что представленные в разд. 1 и 2 краткие обзоры по перемежаемости, когерентным структурам и когерентной турбулентности не претендуют на полноту освещения эволюции этих понятий; цель обзоров — только проследить основные их этапы. Осознавая, что в обзоры включены только те работы, к которым был доступ, авторы настоящей статьи допускают, что в хронологии приведения работ и в авторском приоритете (которые не являлись целью обзоров) могут присутствовать некоторые неточности.

В разд. 3 представлены результаты исследования перемежаемости колмогоровской и когерентной турбулентности в горном пограничном слое. Это итог многолетних экспериментальных исследований турбулентности (акустическими и оптическими методами), выполненных авторским коллективом в высокогорных астрономических обсерваториях. Большая часть представленных экспериментальных данных (эксперименты 2010—2015 гг.) получена в Саянской солнечной обсерватории (ССО). По итогам указанных экспериментов в разд. 3 (таблица) приведены зарегистрированные в оптико-метеорологических измерениях времена жизни турбулентности разного типа (колмогоровской и когерентной).

Как известно, цель обзора по научной проблеме заключается в систематизации результатов существующих научных работ, опубликованных по рассматриваемой проблеме в разных изданиях в разное время. Обзор позволяет оценить общее состояние проблемы и значимость полученных результатов, выявив среди них наиболее важные и интересные. Он также дает возможность проследить существующие тенденции в исследованиях и оценить их дальнейшие перспективы. В этом смысле представленные в разд. 1—3 обзоры можно считать значимыми и полезными.

В целом укажем, что, как видно из результатов настоящей статьи, атмосферная турбулентность существенно влияет на эффективность астрономических наблюдений. При этом для контроля качества изображений важен контроль состояния приземной турбулентности (согласно [9, 10] локальная приземная турбулентность может давать вклад в ухудшение качества получаемых астрономических изображений, достигающий 40%), поэтому исследования структуры турбулентных полей в высокогорных районах размещения астрономических приемников остаются важными и актуальными.

## 1. Виды перемежаемости турбулентности

Приведем краткий обзор опубликованных в мировой научной литературе работ, посвященных изучению перемежаемости турбулентности и видам перемежаемости турбулентности.

Явление перемежаемости турбулентности можно отнести к примечательным свойствам турбулентности; оно известно довольно давно и часто встречается в полевых измерениях. Понятию «перемежаемость» различные исследователи придают разные значения.

Из мировой научной литературы по турбулентности можно выделить следующие основные (традиционно исследуемые и известные уже в течение нескольких десятков лет) виды этого явления: *перемежаемость режимов течений* (ламинарный — турбулентный); вызванная турбулентностью *перемежаемость характеристик течений* (например, направлений завихренности); вызванная турбулентностью *перемежаемость характеристик (свойств) других явлений* (например, характеристик электромагнитных волн, распространяющихся в турбулентной среде); *перемежаемость атмосферной турбулентности в устойчивых температурных стратификациях*; другие подобные виды.

Обзорное описание таких традиционных видов перемежаемости турбулентности (с различной степенью подробности для разных видов) дано в монографиях А.С. Монины и А.М. Яглома [1–4]. В последнее время появились научные работы, в которых рассматриваются некоторые новые виды перемежаемости турбулентности: *перемежаемость типов турбулентности* и связанная с ним *перемежаемость дрожания астрономических изображений*. Исследования этих видов перемежаемости турбулентности были в основном выполнены авторами настоящей статьи с использованием данных измерений в высокогорных астрономических обсерваториях (см. разд. 3).

Чтобы лучше прояснить существующие понятия перемежаемости турбулентности, остановимся кратко на традиционных понятиях перемежаемости, дополнив тем самым обзоры [1–4].

В работах по турбулентности преимущественно описывается явление *перемежаемости режимов*

*течений*, под которым обычно понимается смена (чередование, прерывистость) турбулентного и, как правило, ламинарного режима, происходящая с различной регулярностью (периодичностью) и скажностью.

Подробный обзор экспериментальных данных, касающихся перехода ламинарного течения в турбулентное, содержится в работах Г. Шлихтинга 1962 г. (H. Schlichting, 1959) [11] и Х.Л. Драйдена 1963 г. (H.L. Dryden, 1959) [12]. Теории этого вопроса посвящены многие обзорные статьи, например Дж.Т. Стюарта (J.T. Stuart, 1963) [13], и монографии Ц.Ц. Линя 1958 г. (C.C. Lin, 1955) [14] и С. Чандрасекара 1961 г. (S. Chandrasekhar) [15]. Указанные экспериментальные данные были систематизированы в монографиях А.С. Монины и А.М. Яглома 1965, 1992 гг. [1, 3], при этом в [3] авторы ограничились рассмотрением лишь важнейших (и наиболее простых) течений и основное внимание уделили принципиальной стороне дела.

Описывая течения жидкости в трубах, авторы [3] показывают, что в ламинарном потоке наблюдаются переходные явления, заключающиеся в появлении впервые наблюдавшихся еще в 1883 г. О. Рейнольдсом [16] кратковременных всплесков пульсаций высокой частоты в форме своеобразных «турбулентных пробок», заполняющих все сечение трубы, но на небольших отрезках ее длины. Пробки растягиваются при своем передвижении по трубе, и некоторые из них иногда «догоняют» друг друга и сливаются, образуя одну большую пробку. При этом средняя доля времени, в течение которого в данной точке трубы наблюдается турбулентный режим («коэффициент перемежаемости»), монотонно возрастает с увеличением расстояния от входа в трубу. Как указано в [3], можно думать, что подобные явления очень характерны для широкого круга турбулентных движений и играют большую роль в возникновении и развитии турбулентности. Однако теоретическое их объяснение пока связано с определенными трудностями.

В [3] также указано, что позже Л. Шиллер (L. Schiller, 1934) [17] связал появление таких «турбулентных пробок» с чередующимся образованием и разрушением крупных вихрей на внутренней стенке трубы у ее передней кромки.

С точки зрения авторов настоящей работы, этот результат Л. Шиллера [17] соответствует чередованию образования (на внутренней стенке трубы у ее передней кромки) когерентных структур и их последующего когерентного распада (разрушения главных вихрей когерентных структур). Как будет показано в разд. 2 (п. 2.1, п. 2.4), когерентные структуры обычно возникают при ламинарном обтекании жидкостью различных препятствий, часто формируясь в виде дорожки фон Кармана. Длина дорожки фон Кармана, которая обычно представляет собой цепочку расположенных друг за другом устойчивых (нераспадающихся) вихрей, зависит от вязкости жидкости и скорости набегающего на препятствие потока. Чем больше

скорость и крупнее препятствие, тем длиннее может быть дорожка фон Кармана. Чем дальше от препятствия находится такой устойчивый вихрь в цепочке, тем меньше энергии ему достается для поддержания своей устойчивой формы. Последнему в цепочке вихрю такой энергии не хватает, и он распадается. При этом образуется много более мелких продуктов распада вихря. При наблюдении со стороны (особенно для подкрашенных течений) это выглядит как «пятно» мелкомасштабной турбулентности, или как «турбулентная пробка».

Отметим, что образующиеся при обтекании препятствий главные энергонесущие вихри когерентных структур могут иметь различные размеры. Чем крупнее препятствие и выше скорость набегающего на него потока, тем обычно крупнее возникающие вихри. При достаточной скорости набегающего потока вихри могут возникать и на мелких препятствиях (типа разных шероховатостей на поверхностях). Имеют значение также и формы препятствия — обтекаемые или нет. Теории возникновения вихрей, образующихся при ламинарном обтекании препятствий, обычно объясняют появление вихрей изменением давления жидкости в разных точках на поверхности препятствия (в пограничном слое вблизи поверхности). Часто процесс образования вихрей при обтекании препятствий называют явлением «отрыва пограничного слоя» обтекающей жидкости (см., например, работы Г. Шлихтинга 1962, 1956 гг. (H. Schlichting, 1959, 1951) [11, 18] и А.С. Моница, А.М. Яглома [3]).

Как будет сказано ниже (разд. 1), многие виды перемежаемости турбулентности связаны с образованием и распадом главных вихрей когерентных структур. Это указывает на значительную роль когерентных структур в явлении перемежаемости.

В исторической связи необходимо указать на статью К. Летелле (C. Letellier, 2017) [19], представляющую глубоко ретроспективный и весьма содержательный обзор работ, в которых в различной степени описана перемежаемость в течениях в трубах начиная с трудов 1850-х гг. А. Дарси (H. Darcy) и Г. Хагена (G. Hagen); в обзоре рассмотрены разные аспекты явления с применением различных подходов. Привлекает внимание монография У. Фриш (U. Frisch, 1995) [20], содержащая достаточно подробный обзор трудов по теме перемежаемости, в котором присутствуют: понятийный раздел, обзор экспериментальных результатов, основанных на измерениях скорости и измерениях флуктуации диссипации; обсуждаются два широких класса феноменологических моделей перемежаемости.

В публикации А. Фейдж, Х.Ч.Г. Тауненд (A. Fage, H.C.H. Townend, 1932) [21], посвященной исследованию турбулентного потока с помощью ультрамикроскопа, отмечено, что по мере увеличения числа Рейнольдса не появляются признаки увеличения степени турбулентности, а наблюдается изменение относительной частоты и продолжительности периодов прямолинейного (ламинарного) и турбулентного течений, т.е. характеристик

перемежаемости турбулентности. В.А. Сандборн (V.A. Sandborn, 1959) [22] показал, что перемежающийся характер мелкомасштабной турбулентности в пограничном слое наблюдается уже у стен канала, в то время как у поля скоростей обнаруживается только на большом удалении от них [4].

На основе наблюдений перемежаемости мелкомасштабных пульсаций скорости Е.А. Новиков и Р.В. Стюарт (Е.А. Novikov, R.W. Stewart, 1963, 1964) [23, 24] разработали модель мелкомасштабной структуры поля диссипации энергии; модель перемежаемости турбулентности основана на том, что диссипация энергии сосредоточена в малых областях потока при больших числах Рейнольдса.

Необходимость различать масштабы перемежаемости атмосферной турбулентности показана в работе Л. Махрт (L. Mahrt, 1989) [25]: в условиях, когда масштабы превышают размер основных турбулентных вихрей, можно говорить о глобальной перемежаемости, в то время как на меньших масштабах присутствует мелкомасштабная перемежаемость, которой соответствуют самые сильные мелкомасштабные градиенты скорости, возникающие на краях основных вихрей или микрофронтов.

Чж.С. Ше, Э. Джексон, С.А. Орзаг (Z.S. She, E. Jackson, S.A. Orszag, 1990) [26] в исследовании пространственных перемежающихся структур показали, что в изотропной несжимаемой турбулентности при умеренно высоком числе Рейнольдса сильно перемежающиеся вихревые структуры обычно имеют трубообразную форму.

Методика, основанная на вейвлет-преобразовании для декомпозиции сигнала с сохранением когерентных структур, представлена в статье К.Р. Хагельберг, Н.К.К. Гамадж (C.R. Hagelberg, N.K.K. Gamage, 1994) [27]; она содержит механизм обнаружения когерентных структур, анализ перемежаемости и технику фильтрации; обнаружение структур проанализировано в зависимости от типа вейвлета: симметричного или антисимметричного.

Принимая во внимание значительную роль когерентных структур в явлении перемежаемости, необходимо отметить детальный обзор влияния квазидвумерных структур в пограничном слое атмосферы, авторы Дж.С. Янг, Д.А. Кривович, М.Р. Хьельмфельт, Р.К. Фостер (G.S. Young, D.A. Kristovich, M.R. Hjelmfelt, R.C. Foster, 2002) [28]; в обзоре сделан вывод, что из-за присутствия в пограничном слое множества квазидвумерных явлений важно четко различать их между собой при объединении новых результатов с предыдущими.

Взаимосвязь перемежаемости и определения полного скалярного переноса между поверхностью и атмосферой в очень стабильных условиях, а также влияние прерывистого перемешивания на поверхностные потоки изучены О.К. Асеведо, О.Л. Морaes, Дж.А. Дегразия, Л.Э. Медейрос (O.C. Acevedo, O.L. Moraes, G.A. Degrazia, L.E. Medeiros, 2006) [29].

Роль перемежающегося потока с различными временными масштабами сохранения эффективности переноса тепла и импульса исследована С. Чоудхури, Т. Прабхакаран, Т. Банерджи (S. Chowdhuri,

T. Prabhakaran, T. Vanerjee, 2020) [30]; в работе также представлен новый подход к разделению фаз и амплитуд компонентных сигналов различных временных масштабов.

В контексте влияния перемежаемости при определении свойств атмосферной турбулентности вызывают интерес исследования К. Бартлотт, Ф. Дробински, К. Феске, Т. Дюбо, К. Пьетрас (С. Barthlott, P. Drobinski, C. Fesquet, T. Dubos, C. Pietras, 2007) [31], посвященные долгосрочному, на протяжении 10 месяцев, и весьма обстоятельному изучению когерентных структур в приземном слое атмосферы в различных метеоусловиях с использованием ультразвуковых анемометров CSAT в обсерватории Sirta. Кроме обработки собственных данных в [31] также проводится сравнение с результатами других исследователей, для чего сделан обширный тематический обзор литературы. Термином «когерентный» в [31] обозначена отчетливая крупномасштабная картина пульсаций, которая регулярно наблюдается в подобном турбулентном потоке. Подчеркивается, что основная трудность при работе с когерентными структурами турбулентности состоит в том, чтобы отделить эти организованные структуры от фоновых флуктуаций. В связи с чем разработан улучшенный и эффективный подход с использованием метода объективного обнаружения, основанный на вейвлет-преобразованиях с применением вейвлета «Мексиканская шляпа». Это позволило динамически определять размеры и продолжительность регистрации когерентных структур, а также времена разделения между соседними структурами. Было обнаружено, что когерентные структуры занимали 36% всего времени наблюдений. В заключение авторы [31] оставляют открытым вопрос, намечающий направление будущих исследований, зависит ли результаты также от участка, поскольку подстилающая поверхность варьируется от открытой земли до лесов и городских районов.

Укажем работы, в которых исследуется *перемежаемость конкретных характеристик течений*. Например: М.А. Великанов в 1954 г. [32, с. 306] упоминает чередующиеся, почти периодические (вдоль потока) вертикальные токи, создающие макроформы; А. Зоммерфельд в 1954 г. (A. Sommerfeld, 1949) [33, с. 289] и Г. Биркгоф в 1963 г. (G. Birkhoff, 1960) [34, с. 142] говорят о перемежаемости вихрей; Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе в 1963 г. [35, с. 468] указывают на чередующиеся области вытекания и втекания жидкости; Р. Бетчов, В. Криминале в 1971 г. (R. Betchov, W. Criminale, 1967) [36, с. 30] описывают чередующиеся области жидкости с положительной или отрицательной завихренностью.

Рассматривается также *вызванная турбулентностью перемежаемость характеристик (свойств) других явлений*, например характеристик электромагнитных волн, распространяющихся в турбулентной среде. Так, в некоторых работах имеются косвенные ссылки на перемежаемость турбулентности через описание характеристик астрономических

изображений, полученных под влиянием атмосферной турбулентности. Например, И.Г. Колчинский в 1967 г. [37, с. 7] упоминает перемежающиеся зоны хороших и плохих изображений на солнечном диске.

Остановимся еще на явлениях *перемежаемости атмосферной турбулентности в устойчивых температурных стратификациях*. Как известно [3, 4], температура воздуха не является пассивной примесью, так как при ее отклонениях от среднего значения возникают архимедовы силы (силы плавучести), влияющие на режим турбулентности. Учет температуры изменяет и уравнения движения (уравнения Навье–Стокса): добавляется слагаемое, учитывающее силы плавучести. Если этим слагаемым можно пренебречь, то температурная стратификация называется безразличной (нейтральной), а профили средней температуры и средней скорости ветра имеют логарифмический вид. В общем случае тип стратификации определяется знаком вертикальной производной потенциальной температуры. Если знак отрицательный (потенциальная температура убывает с увеличением высоты над землей, следовательно, вертикальная производная обычной температуры меньше адиабатического градиента), то температурная стратификация называется неустойчивой [1, 2], при этом силы плавучести усиливают турбулентность. Если же знак положительный (потенциальная температура растет с высотой), то стратификация называется устойчивой. Стратификация устойчивая, так как силы плавучести ослабляют развитие турбулентности (силы плавучести препятствуют вертикальным смещениям нагретых микрообъемов воздуха). При этом энергия крупномасштабных движений расходуется в основном на работу по преодолению архимедовых сил (устойчивая стратификация), а не на передачу к более мелкомасштабным компонентам (неустойчивая стратификация).

При наблюдении турбулентных пульсаций в приземном слое атмосферы при устойчивой стратификации [3, 4] характерна заметная перемежаемость: чередование заметных пульсаций температуры с довольно продолжительными, весьма спокойными интервалами. С перемежаемостью турбулентности при устойчивой стратификации обычно связывают относительно большой разброс экспериментальных точек, часто наблюдающийся при такой стратификации.

В целом учет в теории турбулентности сил плавучести позволил А.С. Монину и А.М. Обухова ввести масштаб Монина–Обухова  $L$ , а затем создать теорию, позволяющую прогнозировать характеристики турбулентности для разных температурных стратификаций [3, 4]. В настоящее время эта теория называется теорией подобия Монина–Обухова. Она описывает как средние характеристики, так и статистическую микроструктуру турбулентных полей скорости и температуры (структурные функции, спектры). Теория подобия находит экспериментальное подтверждение как для турбулентности приземного слоя атмосферы [3, 4, 38]

(обычно с ровной подстилающей поверхностью), так и для турбулентности в горном анизотропном пограничном слое [39, 40].

В настоящей работе исследуется *переменяемость колмогоровской турбулентности с турбулентностью другого типа*, а именно *когерентной (неколмогоровской)*, и влияние этого эффекта на качество астрономических изображений. С переменяемостью типа турбулентности обычно напрямую связан эффект *переменяемости дрожания астрономических изображений*. Кратко остановимся на этом эффекте (более подробно он рассмотрен в разд. 3).

В оптико-метеорологических измерениях ранее было установлено [40–46], что над территориями горных обсерваторий часто наблюдается эффект переменяемости дрожания астрономических изображений. Эффект проявляется в достаточной частой смене интервалов сильных и слабых дрожаний изображений. При этом длины интервалов сильных и слабых дрожаний обычно превышают длины выборочных массивов случайных мгновенных значений метеопараметров, которые применяются (в процессах осреднения) в дальнейшем статистическом анализе. Этот факт позволяет говорить о независимости эффекта переменяемости дрожания от длины выборки случайных данных. Таким образом, эффект переменяемости заключается не в случайных изменениях (флуктуациях) того или иного наблюдаемого параметра, а в изменении стабильных состояний этого параметра.

Как показано в [40–46], эффект переменяемости дрожания астрономических изображений соответствует смене типа турбулентности над астрономическим приемником. Эффект *возникает* при переносе ветром сформировавшихся в атмосфере областей когерентной (неколмогоровской) турбулентности, *заключается* в периодическом ослаблении и усилении фазовых флуктуаций оптического излучения (с интервалами от 6 до 39 мин) и *обусловлен* наличием большого числа областей когерентной турбулентности с наветренной стороны (и их последующим ветровым переносом).

Измерения 2010–2015 гг. [40–53] подтверждают существование эффекта переменяемости дрожания и уточняют условия его проявления. При этом, как следует из результатов указанных работ, возникновение областей когерентной турбулентности, перемещающихся затем в точку наблюдения ветром (и приводящих к появлению эффекта переменяемости дрожания), зависит от сезона года, направления ветра и типа подстилающей поверхности.

Таким образом, можно утверждать, что эффект переменяемости дрожания астрономических изображений является следствием эффекта переменяемости типа турбулентности. Сам же эффект переменяемости типа турбулентности заключается в периодической смене типа турбулентности, когда когерентная турбулентность сменяется (переменяется) колмогоровской. Как установлено в вышеуказанных работах, эффект возникает из-за перемещения ветром как целого протяженных областей

атмосферного воздуха с колмогоровским либо когерентным типом турбулентности через территорию обсерваторий, что и приводит (при наблюдении в неподвижной точке) к переменяемости типа турбулентности. Это регистрируется в наземных оптико-метеорологических измерениях, в том числе и в виде переменяемости дрожания астрономических изображений.

Важным прикладным аспектом в атмосферно-оптических задачах является то, что фазовые и слабые амплитудные флуктуации оптического излучения в условиях когерентной турбулентности становятся ниже, чем в условиях колмогоровской [8, 41, 42, 54]. Это приводит к значительному уменьшению дрожания астрономических изображений и, следовательно, к улучшению их качества.

В наших полевых измерениях в горных обсерваториях, описываемых далее (см. разд. 3), многократно регистрировался эффект переменяемости дрожания астрономических изображений, вызванный переменяемостью типа турбулентности: качество астрономических изображений становилось лучше (снижалось дрожание изображений) при «наплыве» на телескоп области когерентной турбулентности и возвращалось к исходному при колмогоровской турбулентности.

## 2. Когерентная и колмогоровская турбулентность

В связи с имеющимися в мировой научной литературе различными толкованиями понятия когерентной турбулентности и недостаточно широкой распространенностью этого термина далее мы кратко опишем механизмы появления (формирования) когерентной турбулентности и ее ключевые свойства. Также покажем связи и различия между когерентной и колмогоровской турбулентностью.

### 2.1. Исследования и определение когерентной турбулентности

«Колмогоровской» турбулентностью обычно называется турбулентность, образующаяся в «общей картине турбулентного движения» по А.Н. Колмогорову [55–59], которую на языке его статей можно кратко описать следующим образом. На осредненное движение жидкости накладываются «пульсации первого порядка» размером  $l^{(1)} = l$  (где  $l$  – Прандтлевский путь перемешивания [60]) и скоростями  $u^{(1)}$ , на которые вследствие неустойчивости при очень больших числах Рейнольдса [61, 62] накладываются пульсации второго порядка с длиной пути перемешивания  $l^{(2)} < l^{(1)}$  и относительными скоростями  $u^{(2)} < u^{(1)}$ , на которые, в свою очередь, продолжают накладываться пульсации последующих порядков до тех пор, пока вязкость не останавливает образование таких пульсаций. При этом энергию, получаемую от самого потока, пульсации первого порядка (масштаба  $L_0$ ) сообщают пульсациям меньших масштабов до масштабов порядка  $l_0$

(где энергия уже диссипирует в тепло), формируя тем самым непрерывный каскадный поток энергии. Локальная структура турбулентности однородна и изотропна при масштабах  $r \ll L_0$ . Движение, где нет осредненного потока, со временем затухает. Ключевое свойство колмогоровской турбулентности заключается в том, что спектральная плотность энергии локально однородной и локально изотропной турбулентности в инерционном интервале одномерного пространственного спектра описывается «законом  $-5/3$ ». С практической точки зрения интерес представляет информация о структуре турбулентных потоков, содержащаяся во временных частотных спектрах флуктуаций температуры  $W_T(f)$ , инерционные интервалы которых имеют вид  $W_T(f) \sim f^{-5/3}$ .

Под «когерентной» турбулентностью подразумевается турбулентность, образующаяся в области с преобладающим влиянием одной когерентной структуры. При этом природа когерентной турбулентности определяется главной ее составляющей — когерентной структурой. Важным моментом является понимание самой когерентной структуры. Известно множество определений когерентной структуры, например [3, 4, 63–72, 104, 105]. В наших исследованиях [40–43, 47, 48] под *гидродинамической когерентной структурой* понимается компактное образование, включающее в себя долгоживущую пространственную *вихревую ячейку* (главный энергонесущий вихрь), возникающую в результате продолжительного действия термодинамических градиентов, и *продукты ее дискретного когерентного каскадного распада*. При этом как *сам крупномасштабный главный вихрь* (который ранее в литературе считался просто основным энергонесителем и в структуру турбулентности не включался), так и *продукты его дискретного каскадного когерентного распада* (мелкомасштабные вихри с кратными частотами) оказываются *жестко связанными — когерентными или синфазными (согласованными)*. Таким образом, когерентная структура — это *целое семейство синфазных вихрей*: главный вихрь и когерентные (синфазные) ему вихри — продукты его распада. Иными словами, когерентная структура является *самокогерентной* или *внутренне когерентной*, т.е. когерентной внутри себя.

В таком 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. Такое обобщенное определение когерентной структуры позволяет объединить известный турбулентный каскад передачи энергии и когерентность (синфазность, согласованность, зависимость) всех вихрей в структуре. Турбулентность, возникающая в результате распада главного вихря, является *когерентной и детерминированной*. Таким образом, когерентная турбулентность так же, как и коге-

рентная структура, является *самокогерентной* или *внутренне когерентной*, т.е. когерентной внутри себя [40–43, 47–52].

Когерентность турбулентности можно пояснить следующим образом. На рис. 1 показаны частоты гармоник в спектре флуктуаций температуры  $W_T$  одной когерентной структуры [42].

Гармоники соответствуют частотам распадных вихрей, образующихся в когерентной структуре. Частоты вихрей  $f_n$  кратны частоте главного энергонесущего вихря  $f_1$ . Нормированные на  $f_1$ , они являются целыми натуральными числами ( $n = 1, 2, \dots$ ):  $f_n/f_1 = 1, 6, 8, 11, 13, 17, 20, \dots$ . *Кратные частоты есть точный результат дискретного распада главного энергонесущего вихря на более мелкие*. Кратность означает также, что фазы различных гармоник (колебаний) жестко связаны, т.е. согласованы; в этом случае сами колебания обычно называются когерентными или синфазными. Главный вихрь когерентной структуры (рис. 1) распадается по известному сценарию стохастизации М.Дж. Фейгенбаума (M.J. Feigenbaum) [40, 42, 73]; это подтверждается тем, что константы Фейгенбаума:  $\alpha = 2,503$ ,  $\alpha^2 = 6,265$ ,  $\delta = 4,669$ , проявляются в спектре как уровни насыщения нормированной частоты  $y_n = f_n/(nf_1)$ .

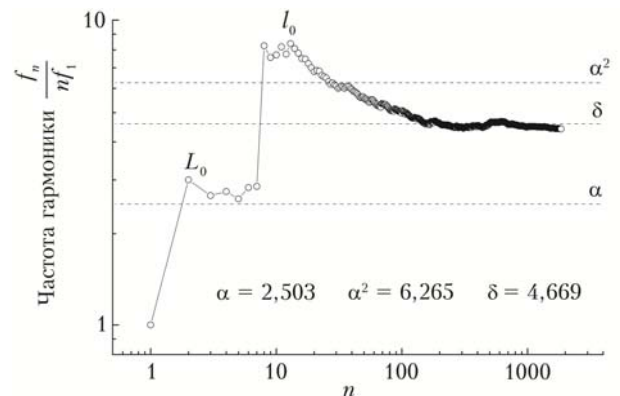


Рис. 1. Частоты стабильных гармоник (вихрей)  $f_n$  в спектре флуктуаций  $W_T$ ;  $\alpha$ ,  $\alpha^2$ ,  $\delta$  — константы Фейгенбаума ( $\delta$  — главная константа Фейгенбаума);  $n$  — номер гармоники

Как видно из рис. 1, с ростом номера гармоники  $n$  частота  $y_n$  испытывает два крупных скачка: 1) в районе (кармановского) внешнего масштаба турбулентности  $L_0$  на уровне насыщения  $\alpha$ ; 2) в районе внутреннего масштаба  $l_0$  на уровне  $\delta$ , минуя  $\alpha^2$ .

Проявления когерентной турбулентности известны уже на протяжении почти полувека. К одним из первых научных работ, в которых появился термин «когерентная турбулентность», можно отнести работы А. Михалке, Г. Фукса (A. Michalke, H. Fuchs, 1975) [74, с. 190] и Р. Адриана (R. Adrian, доклад 1975 г. опубликован в 1977 г.) [75, с. 323]. При этом теоретические основы этого явления начали разрабатываться относительно недавно.

Когерентная турбулентность активно исследуется, о чем свидетельствует множество научных



работ: работа Р. Адриана (R. Adrian) [75] посвящена изучению роли условного среднего в теории турбулентности и обнаружению когерентной турбулентности; А.К.М.Ф. Хуссейн (A.K.M.F. Hussain, 1981) [76, с. 260] подчеркивает, что когерентная и фоновая турбулентность некоррелированы, при этом фактически фоновая турбулентность создается и организуется когерентными структурами; Л.Г. Лойцянский в 1987 г. (L.G. Loitsyansky) в монографии [77] отметил, что раздел теории турбулентности, посвященный когерентной турбулентности [77, с. 615], объясняет турбулентное перемешивание в следах обтекания наличием дискретных вихревых структур [77, с. 623], а также указал, что когерентная турбулентность образуется в предотрывных областях пристенных пограничных слоев, в природных условиях – смерчах и циклонах, в следах обтекания, в турбулентных струях [77, с. 615] – и что законам когерентной турбулентности подчиняется взаимодействие крупных вихрей [77, с. 723]; в справочнике «Атмосфера» 1991 г. [78, с. 201] выдвинута гипотеза, что значительный вклад в формирование когерентной турбулентности, вероятно, вносится и самоорганизацией мелкомасштабной турбулентности в процессе нелинейного взаимодействия ее элементов [7, 8]; А. Верне, Г.А. Копп, Ж.А. Ферре, Ф. Гиральт (A. Vernet, G.A. Kopp, J.A. Ferré, F. Giralt, 1999) в работе [79, с. 328] объемные когерентные движения объясняют как переход от некогерентной к когерентной турбулентности через убыль некогерентной турбулентности, способствующую поддержанию когерентной турбулентности; в работе Дж. Рю, К. Чеонг, С. Ким, С. Ли (J. Ryu, C. Cheong, S. Kim, S. Lee, 2005) [80, с. 1279] установлено, что за препятствиями образуется крупномасштабная когерентная турбулентность; в статье С. Миллет, Дж.К. Робинет, С. Роблин (C. Millet, J.C. Robinet, C. Roblin, 2007) [81] использовано новое поколение численных методов для моделирования нелинейного дальнего распространения инфразвуков в реалистичной атмосфере, а также развивающейся в атмосфере крупномасштабной когерентной турбулентности; в статье А.В. Боровика, П.А. Коняева 2014 г. [82, с. 32] отмечено улучшение качества изображений в телескопе в условиях, соответствующих когерентной турбулентности; в работе М.В. Волкова и др. 2020 г. [83] по исследованию эффективности фазирования света, прошедшего через турбулентную среду, сделан вывод о присутствии в эксперименте когерентной турбулентности.

Подробный исторический и терминологический обзор исследований когерентной турбулентности начиная с XIX в. сделан нами в работах [7, 8]. В этих же работах кратко изложены основные теоретические положения когерентной турбулентности. Поэтому приведенные в [7, 8] результаты далее не будем рассматривать подробно. Остановимся только на некоторых важных свойствах когерентной турбулентности, к которым можно отнести спектр когерентной турбулентности, связь колмогоровской

и когерентной турбулентности. Укажем также некоторые ключевые свойства когерентной турбулентности.

## 2.2. Спектр когерентной турбулентности

Подробный вывод выражения для спектра когерентной турбулентности представлен в [40–42, 47, 84]; здесь для удобства восприятия кратко приведем основные положения. Приближенную модель спектра когерентной турбулентности  $\Phi_T(\kappa)$  можно получить, используя модель Кармана с убыванием в инерционном интервале, соответствующим изображенному на рис. 2.

В общем случае одномерный пространственный спектр фон Кармана  $V(\kappa)$  записывается следующим образом [38]:

$$V(\kappa) = V(0)[1 + \kappa^2/\kappa_0^2]^{-(\nu+1/2)} \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2), \quad (1)$$

$$V(0) = B(0)\kappa_0^{-1} \pi^{-1/2} \Gamma(\nu + 1/2)/\Gamma(\nu),$$

где  $L_0$  – внешний масштаб турбулентности,  $l_0$  – внутренний масштаб;  $\kappa_0 = 2\pi/L_0$ ,  $\kappa_m = 5,92/l_0$  – пространственные частоты  $\kappa$  для  $L_0$  и  $l_0$ ;  $B(0)$  – дисперсия случайного процесса;  $\Gamma(\nu)$  – гамма-функция;  $\nu$  – параметр.

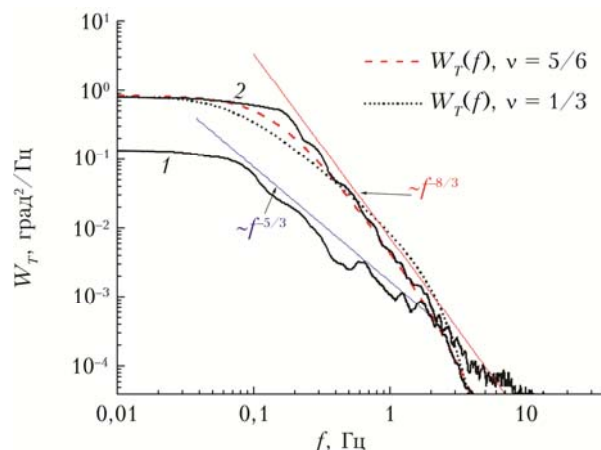


Рис. 2. Экспериментальные временные частотные спектры флуктуаций температуры  $T$ : 1 – атмосфера; 2 – закрытое помещение

Далее используем соотношение связи пространственных  $\kappa$  и временных  $f$  частот

$$\kappa = \omega/\nu = 2\pi f/\nu, \quad (2)$$

где  $\nu$  – модуль вектора скорости, а также связь временного спектра  $W(f)$  по положительным частотам  $f$  с пространственным спектром  $V(\kappa)$  [38]:

$$W(f) = (4\pi/\nu)V(2\pi f/\nu). \quad (3)$$

Как следует из формулы (3) и из рис. 2, в выражении (1) колмогоровской турбулентности соответствует  $\nu = 1/3$ , а когерентной турбулентности –  $\nu = 5/6$ . Если еще учесть связь между трехмерной



$\Phi(\kappa)$  и одномерной  $V(\kappa)$  спектральными плотностями [38]:

$$\Phi_T(\kappa) = -(2\pi\kappa)^{-1} dV_T(\kappa)/d\kappa,$$

то после дифференцирования одномерного пространственного спектра фон Кармана  $V(\kappa)$  (1) можно получить приближенную модель спектра турбулентности [40–42, 47, 84, 85] (например, для флуктуаций температуры) с произвольным значением параметра  $\nu$ :

$$\Phi_T(\kappa) = A_0 C_T^2 (6,6\kappa_0)^{2(\nu-1/3)} \kappa^{-2(\nu+3/2)} \times \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2) [1 - \exp(-\kappa^2/\kappa_0^2)], \quad (4)$$

где  $A_0 = 0,033$ ;  $C_T^2$  – структурная характеристика флуктуаций поля температуры [38].

Отсюда, задавая конкретные значения параметра  $\nu$ , можно получить трехмерные спектры температуры как для колмогоровской, так и для когерентной турбулентности.

Например, при  $\nu = 1/3$  из (4) получаем известный трехмерный спектр температуры в колмогоровской турбулентности

$$\Phi_T(\kappa) = A_0 C_T^2 \kappa^{-11/3} \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2) \times [1 - \exp(-\kappa^2/\kappa_0^2)]. \quad (5)$$

Для этого спектра в инерционном интервале ( $\kappa_0 \ll \kappa \ll \kappa_m$ )  $\Phi_T(\kappa) \sim \kappa^{-11/3}$  и одномерный временной частотный спектр имеет вид  $W_T(f) \sim f^{-5/3}$  (см. ур. (11) ниже).

При  $\nu = 5/6$  из (4) получаем трехмерный спектр температуры в когерентной турбулентности

$$\Phi_T(\kappa) = A_0 C_T^2 (6,6\kappa_0) \kappa^{-14/3} \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2) \times [1 - \exp(-\kappa^2/\kappa_0^2)]. \quad (6)$$

Для этого спектра в инерционном интервале (где  $\kappa_0 \ll \kappa \ll \kappa_m$ )  $\Phi_T(\kappa) \sim \kappa^{-14/3}$  и одномерный временной частотный спектр имеет вид  $W_T(f) \sim f^{-8/3}$  (см. ур. (10) ниже).

Спектр (4) соответствует трехмерному спектру фон Кармана, но записан в экспоненциальной форме. Он получен с учетом приближенной связи между внешними масштабами для  $\nu = 5/6$  и  $1/3$  (колмогоровский внешний масштаб больше когерентного в среднем в 2,3 раза [40]) и связи при  $\nu = 1/3$  между часто применяемым кармановским внешним масштабом  $L_0^K$  и экспоненциальным  $L_0$  (обычно  $L_0 = 0,54L_0^K$ , см. [40, 85]). Экспоненциальный спектр (4) отклоняется от кармановского только в энергетическом интервале, где  $\kappa \ll \kappa_0$ . Однако при  $\nu = 1/3$  (и для  $L_0 = 0,54L_0^K$ ) он дает практически такие же результаты, как и обычный кармановский спектр [85], в то же время значительно упрощая расчеты.

Выражение (6) для трехмерного спектра температуры подходит для описания когерентной турбулентности [42] и дает хорошее согласие теории с экспериментом. «–8/3»-степенное убывание (см. ур. (10) ниже) инерционного интервала в одномер-

ном частотном спектре турбулентности в одной когерентной структуре было установлено из исследований экспериментальных спектров турбулентности внутри когерентных структур [40, 42, 47, 49, 52, 84]. Это также подтверждено численными решениями краевых задач для уравнений Навье–Стокса [8, 40, 48, 50, 52, 86], в которых краевые условия соответствуют данным, зарегистрированным в реальном эксперименте.

### 2.3. Связь колмогоровской и когерентной турбулентности

Понятия «когерентная турбулентность» и «колмогоровская турбулентность» можно выразить и на языке спектров параметров турбулентного движения. Сформулированные таким образом понятия соответствуют предыдущим определениям и уточняют (конкретизируют) их. Так, например, в наших работах [53, 54, 87] установлено, что спектры атмосферной турбулентности, наблюдаемой в экспериментах, являются совокупностью (суммой) спектров разных когерентных структур, у которых внешние масштабы различаются. Одномерный пространственный спектр одной когерентной структуры (например, флуктуаций температуры) представляется в виде [41, 54]:

$$V(\kappa, \kappa_0) = c_V \kappa_0 (\kappa_0^2 + \kappa^2)^{-4/3}, \quad (7)$$

где  $c_V = 0,514 C_T^2$ . Уравнение для огибающей параметрического семейства  $\phi(x, y, \lambda) = 0$  можно получить [88], исключив параметр  $\lambda$  из уравнений семейства и уравнения  $\partial\phi/\partial\lambda = 0$ . Следовательно, для семейства спектров (7) с параметром  $\kappa_0$  уравнение для огибающей получается из уравнения

$$\partial V(\kappa, \kappa_0)/\partial \kappa_0 = 0, \quad (8)$$

решением которого является  $\kappa_0 = \kappa_{0 \max} = (3/5)^{1/2} \kappa$ . Подставляя  $\kappa_{0 \max}$  в (7), получим верхнюю огибающую семейства спектров (7) с параметром  $\kappa_0$ :

$$V(\kappa, \kappa_{0 \max}) = c_V (3/5)^{1/2} (5/8)^{4/3} \kappa^{-5/3} \approx 0,4 c_V \kappa^{-5/3}. \quad (9)$$

Временной частотный спектр для одной когерентной структуры можно получить, подставив в (3) выражение (7), учитывая (2) и  $\kappa_0 = 2\pi/L_0$  из (1),

$$W(f) = (4\pi/\nu) c_V \kappa_0 (\kappa_0^2 + 4\pi^2 f^2/\nu^2)^{-4/3},$$

который в инерционном интервале ( $\kappa_0 \ll 2\pi f/\nu \ll \kappa_m$ ) имеет следующую асимптотику:

$$W(f) \sim f^{-8/3}, \quad (10)$$

а временной частотный спектр для огибающей семейства спектров когерентных структур получим, подставив в (3) выражение (9) с учетом (2),

$$W(f) = (4\pi/\nu) c_V (3/5)^{1/2} (5/8)^{4/3} (2\pi f/\nu)^{-5/3},$$

асимптотика которого в инерционном интервале имеет вид

$$W(f) \sim f^{-5/3}. \quad (11)$$

Таким образом, при одинаковой интенсивности турбулентности (одинаковых  $C_T^2$ ) кривая, соответствующая инерционному интервалу одномерного спектра колмогоровской турбулентности (рис. 3), является верхней огибающей суммы всех спектров разных когерентных структур с различными внешними масштабами турбулентности [54].

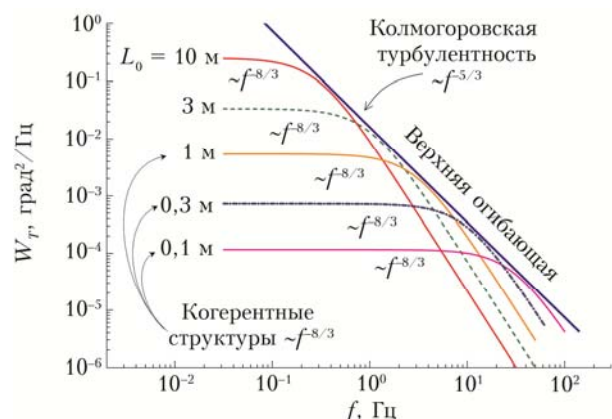


Рис. 3. Верхняя огибающая ( $W_T \sim f^{-5/3}$ ) суммы всех спектров разных когерентных структур ( $W_T \sim f^{-8/3}$ ) с различными внешними масштабами турбулентности ( $L_0$ ) соответствует колмогоровской турбулентности ( $W_T \sim f^{-5/3}$ )

Если разница между внешними 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 [55–59]. Как видно, ее можно представить как результат «смешивания» множества когерентных структур с разными частотами главных вихрей и, следовательно, с разными внешними масштабами. В соответствии с вышеуказанными рассуждениями колмогоровская турбулентность есть некогерентная турбулентность.

Если же 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, она имеет название «когерентная турбулентность» и представляет собой одно семейство распадных когерентных (синфазных) вихрей – продуктов каскадного распада одного главного энергонесущего вихря (включая и сам главный вихрь).

Таким образом, если в рассматриваемой области когерентные структуры имеют близкие размеры и «хорошо смешаны», то наблюдается изотропия турбулентности, описываемая колмогоровским спектром (колмогоровская турбулентность, рис. 4, а). Если же одна из когерентных структур существен-

но больше других (или же структуры значительно удалены друг от друга), то наблюдается анизотропия турбулентности, описываемая спектром когерентной турбулентности (рис. 4, б). Промежуточные, переходные состояния из одного типа турбулентности в другой довольно типичны (рис. 4, в).

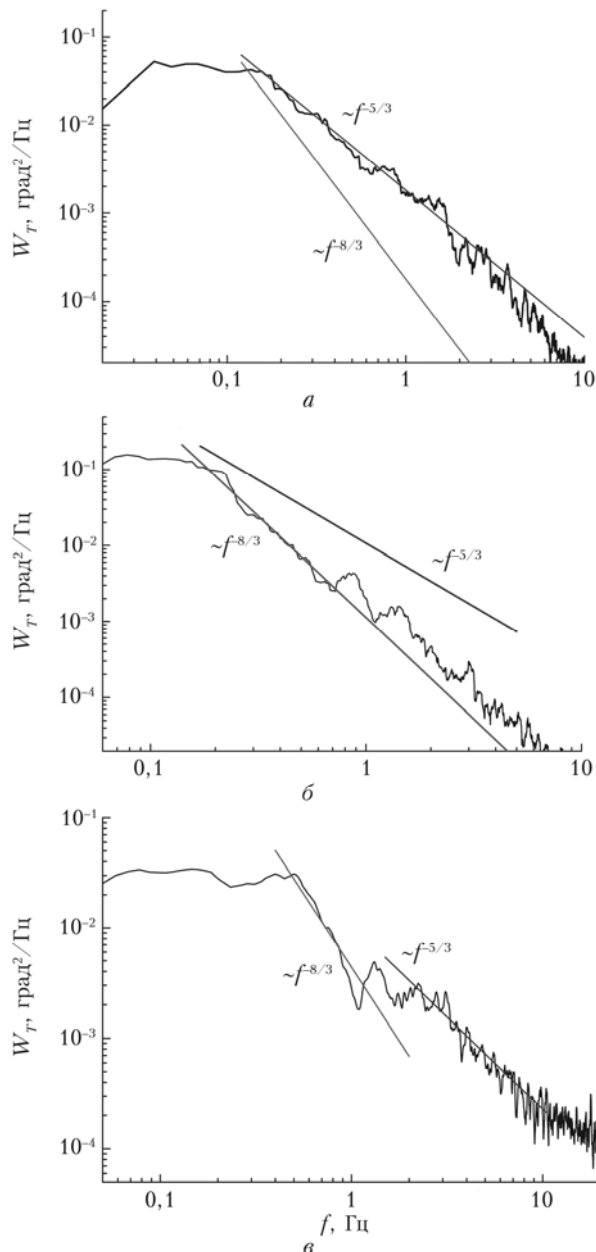


Рис. 4. Временные частотные спектры флуктуаций температуры в ССО: а – колмогоровская турбулентность, измерения 14.08.2014 г.; б – когерентная турбулентность, измерения 29.09.2013 г.; в – типичный спектр, измерения 16.09.2013 г.

Когерентная турбулентность (рис. 4, б,  $W_T \sim f^{-8/3}$  в инерционном интервале) отличается [8, 42] от колмогоровской (рис. 4, а,  $W_T \sim f^{-5/3}$ ) большим наклоном инерционного интервала (или большей скоростью спада) одномерного спектра флуктуаций температуры или скорости; при этом удельный вес диапазона высоких частот спектра ниже.

## 2.4. Ключевые свойства когерентной турбулентности

Кратко перечислим некоторые ключевые свойства когерентной турбулентности, необходимые для дальнейшего изложения.

В наших работах [41, 43, 53, 54, 84, 96] (2008–2019 гг.) показано, что реальную атмосферную турбулентность можно рассматривать как некогерентную смесь различных когерентных структур с несоизмеримыми частотами главных энергонесущих вихрей. Этот результат соответствует представлению о турбулентности как о результате взаимодействия конечного числа когерентных структур. Вместе с тем о такой же возможной картине устройства турбулентности говорилось в 1991 г. А.С. Мониним в статье [89, с. 855]. В монографии А.С. Монина, А.М. Яглома 1992 г. [3, с. 161] и в статье 1994 г. [90, с. 16] также сделан вывод, что такое представление о турбулентности (как о пространственно-временном хаосе конечного числа взаимодействующих когерентных структур) может служить физической расшифровкой гипотезы Э. Хопфа (E. Hopf, 1948) [91, с. 305] о конечномерности аттракторов в фазовом пространстве решений уравнений Навье–Стокса. Из сравнения указанных представлений видно, что научные взгляды на структуру турбулентности, сформированные в разные исторические периоды, совпадают; при этом результаты авторов фактически являются доказательством гипотезы Э. Хопфа в ее интерпретации, сформулированной А.С. Мониним и А.М. Ягломом. Это дает основание утверждать, что представление о турбулентности как о пространственно-временном хаосе конечного числа взаимодействующих когерентных структур близко к истинному. При этом «хаос» турбулентности является в значительной степени детерминированным [48].

Турбулентность в виде некогерентной смеси различных когерентных структур с несоизмеримыми частотами главных энергонесущих вихрей обычно и называется колмогоровской. Она описывается широко известной колмогоровской моделью [55–59] и обладает некоторыми свойствами изотропии как хорошо перемешанная совокупность взаимопроникающих областей с когерентной турбулентностью. Как видно из вышеизложенного, когерентная турбулентность порождается распадными процессами в когерентных структурах.

Когерентные структуры в научных исследованиях известны довольно давно. К первым научным работам, в которых используется понятие «когерентная структура» применительно к гидродинамике, можно отнести работы О. Рейнольдса (1883) [16], Н.Е. Жуковского (1919) [92], И. Никурадзе (1929–1931) [93]. Как указывается в работах А.С. Монина (1958) [94, с. 286] и А.С. Монина, А.М. Яглома [3], ранее когерентные структуры чаще носили название макроструктурных элементов турбулентности.

Терминологический и исторический обзор исследований когерентных структур начиная с XIX в. сделан нами в работах [7, 8]. На приведенных в них результатах останавливаться не будем, укажем

только некоторые важные свойства когерентных структур, формирующих области когерентной турбулентности, и результаты их пространственного смешивания.

Размеры когерентной структуры нечеткие. Течения, внешние по отношению к главному вихрю когерентной структуры, могут сдувать (разносить, развеивать) в пространстве когерентную структуру (другими словами – переносить продукты распада главного вихря когерентной структуры на значительные расстояния), образуя *протяженный турбулентный след*. В атмосфере размеры главных энергонесущих вихрей различных когерентных структур могут отличаться друг от друга в сотни миллионов раз: от нескольких сантиметров (пристеночная турбулентность) до нескольких тысяч километров (ячейки общей циркуляции атмосферы – ячейки Гадлея и Ферреля). Конвективная (возникающая за счет градиентов температуры) когерентная структура распадается по известному сценарию стохастизации Фейгенбаума [40, 42, 73].

В воздушных потоках за препятствиями появляется градиент давления и образуются когерентные структуры, часто формируясь в виде дорожки фон Кармана. При обтекании препятствий, например гор, вследствие постоянной генерации крупных вихрей (ячеек) и переноса продуктов их распада внешним течением течения сразу за препятствиями обеднены мелкими вихрями. Поэтому непосредственно за препятствием спектр флуктуаций соответствует когерентной турбулентности. С увеличением расстояния от препятствия вихри (являющиеся продуктами распада) из турбулентных следов когерентных структур смешиваются с окружающей турбулентной атмосферой, и турбулентность *из когерентной постепенно переходит в колмогоровскую* [42]. При этом, как показывают данные измерений [42], структурная характеристика флуктуаций показателя преломления  $C_n^2$  уменьшается при приближении к препятствию: например, на расстоянии 1 м от искусственного препятствия  $C_n^2$  обычно на порядок меньше, чем вдали от препятствия – на расстоянии 3 м и более.

Проявление когерентных структур и их смешивание проиллюстрированы на рис. 5, где представлены результаты натурных измерений астроклимата на метеовышке Большого телескопа азимутального (БТА, Северный Кавказ) [52]. В спектре наблюдаются два локальных максимума с наклонами в инерционных интервалах  $W_T \sim f^{-8/3}$ , характерными для когерентной турбулентности, что проявляет две когерентных структуры. Следуя в область более высоких частот, наклон спектра становится близок к колмогоровскому спектру  $W_T \sim f^{-5/3}$ , отражая результат смешивания высокочастотных продуктов распада из двух когерентных структур (как между собой, так и с окружающей атмосферой).

Отметим, что нами зарегистрировано большое количество спектров турбулентности в атмосфере (десятки тысяч). Среди них содержится большое количество спектров, подобных приведенному на рис. 5.

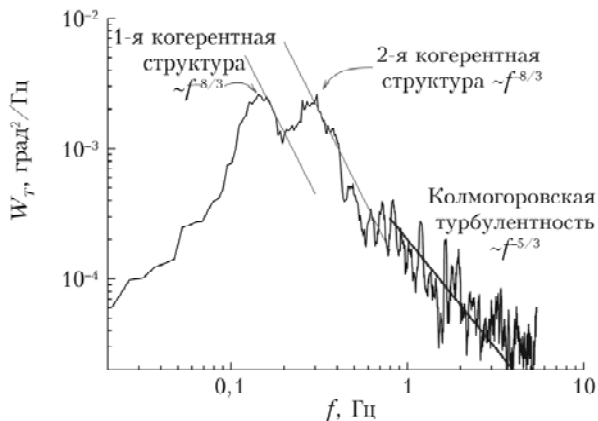


Рис. 5. Временной частотный спектр флуктуаций температуры. Два максимума в спектре. Измерения 07.08.2016 г. на метеовышке БТА

Как видно из рис. 5, даже если каким-либо образом установлено присутствие в атмосфере достаточно крупных энергонесущих вихрей (подкрашивание течений дымами с последующим фотографированием, анализ быстро сформированного временного спектра турбулентности, исследование накопленной случайной выборки метеополей по некоторым критериям [31] и др.), то внутри когерентной структуры, порождаемой этим главным вихрем, кроме продуктов его распада всегда будут присутствовать продукты распада главных вихрей от соседних когерентных структур (их можно рассматривать как внешние примеси другого гармонического состава). Если таких примесей много и они хорошо перемешаны (соседние когерентные структуры имеют близкие размеры к рассматриваемой выделенной структуре), то внутри рассматриваемой структуры наблюдается изотропия турбулентности, описываемая колмогоровским спектром (колмогоровская турбулентность). Если же таких примесей мало или они мелкие (соседние когерентные структуры имеют существенно меньшие размеры), то внутри рассматриваемой структуры наблюдается анизотропия турбулентности, описываемая спектром когерентной турбулентности. Второй случай (когда выделенная когерентная структура имеет мало примесей) позволяет рассматривать эту когерентную структуру как «уединенную» или «чистую». Исследование экспериментальных спектров турбулентности внутри таких «чистых» когерентных структур позволило установить « $-8/3$ »-степенное убывание инерционного интервала спектра турбулентности в одной когерентной структуре [40, 42, 47, 49, 52, 84].

В атмосферной турбулентности выделение «чистых» («уединенных») когерентных структур, формирующих области когерентной турбулентности, как можно видеть из результатов экспериментов, приведенных ниже, является непростой задачей. В то же время в воздухе закрытых помещений «чистые» когерентные структуры возникают часто. Следовательно, в закрытых помещениях часто обнаруживаются области когерентной турбулентности. Здесь они появляются вследствие существования внутри

помещений неоднородностей нагрева (градиентов температуры) и регистрируются как «чистые» из-за обычно слабого перемешивания воздушной среды в помещениях (слабее, чем в атмосфере) возникающими потоками.

Наблюдаемые в полностью закрытом помещении стационарные циркуляционные воздушные потоки (вихри) можно интерпретировать как конвективные ячейки Бенара в воздухе. Внутри закрытых специализированных помещений астрономических телескопов нами зарегистрирована интенсивность когерентной турбулентности, сравнимая с внешней атмосферной турбулентностью, а средняя скорость движений воздуха может достигать значений до 1 м/с [8].

Когерентные структуры были зарегистрированы во всех измерениях параметров турбулентности, выполненных нами за период более десятка лет. Измерения произведены в разное время в различных географических районах и климатических условиях: в горных регионах обсерваторий юга Сибири (Байкальская астрофизическая и Саянская солнечная обсерватории), в горах Кольванского хребта и Северного Кавказа. В наших работах [40, 42, 47] сделан обзор опубликованных в мировой литературе результатов изучения свойств когерентных структур. Сравнение установленных нами свойств структур с известными результатами позволило обобщить представления о когерентных структурах в атмосфере. В настоящее время нами сформулировано 28 различных свойств когерентных структур, наблюдающихся в атмосфере.

Области когерентной турбулентности могут возникать вследствие множества различных причин: за крупным препятствием для потоков атмосферного воздуха (горы), из-за температурной пестроты подстилающей поверхности, возле береговых линий, в результате конвекции и др. Колмогоровская (некогерентная) турбулентность обнаруживается чаще всего над участками с ровной подстилающей поверхностью. В этом случае на основании данных наших измерений [7, 8, 40, 42, 84] и численных решений уравнений Навье–Стокса [48, 50] можно утверждать, что колмогоровская турбулентность над ровной подстилающей поверхностью представляет собой результат хорошего смешивания многих когерентных структур разного размера (они накладываются друг на друга). Такие когерентные структуры обычно имеют вид конвективных термик и возникают, как правило, из-за неоднородностей теплового нагрева подстилающей поверхности.

### 3. Результаты экспериментальных наблюдений

#### 3.1. Материалы и методы, применяемые в экспериментах

Оптические измерения проводились в ССО Института солнечно-земной физики СО РАН на Автоматизированном горизонтальном солнечном телескопе

(АСТ). Эксперименты, подтверждающие изменение типа турбулентности (эффект перемежаемости), проведены также в Байкальской астрофизической и Специальной астрофизической обсерваториях (см. п. 3.2 и работы [8, 42, 52, 95–97]). Конструкция телескопа АСТ включает в себя целостную установку, представляющую собой систему из двух плоских зеркал диаметром 800 мм. В качестве фотоприемника использовался установленный в фокусе главного зеркала телескопа датчик Брандта, являющийся фотоэлектрическим регистратором дрожания [98–100]. Точность измерения дрожания датчиком не ниже  $0,1''$ , верхний предел разрешения по частоте – 100 Гц. Принцип действия регистратора основан на измерении фототока, величина которого пропорциональна линейному смещению изображения (дрожанию края солнечного диска) по оптической щели, за которой установлен светоприемник. Калибровка измеряемого светового потока производится по разности потоков при полной засветке щели Солнцем и при отсутствии Солнца на щели. Полученные данные после обработки аналогово-цифровым преобразователем записываются на жесткий диск компьютера. Датчик Брандта прошел успешную апробацию (разными международными группами исследователей) в течение нескольких десятков лет и ранее применялся в аналогичных исследованиях [40, 42, 44–46, 98–100].

Одновременно с оптическими измерениями ультразвуковым автономным метеорологическим комплексом АМК-03 [101–103] вблизи приемного телескопа производился непрерывный контроль метеоситуации с определением типа турбулентности (когерентная или колмогоровская). Комплекс АМК-03 регистрирует шесть метеорологических параметров и в реальном времени рассчитывает более сотни статистических параметров атмосферной турбулентности. Частота снятия отсчетов может быть выбрана в диапазоне 10–160 Гц. К регистрируемым метеопараметрам относятся температура воздуха, три ортогональных компоненты вектора скорости ветра (и направление горизонтального ветра), атмосферное давление и относительная влажность воздуха. Они сохраняются в оперативной памяти компьютера за временной интервал, равный установленному времени усреднения, отсчитываемый назад от момента поступления последнего информационного пакета из устройства. То есть всегда имеются выборочные массивы мгновенных значений метеопараметров с большим количеством их элементов (например, 48000 при усреднении за 10 мин). Программное обеспечение в заданные оператором сроки и периоды наблюдений вычисляет из этих массивов средние значения метеопараметров и другие их статистические моменты, а также стандартные числовые характеристики атмосферной турбулентности, автоматически сохраняя полученные результаты в текстовых файлах. К основным рассчитываемым характеристикам турбулентности относятся потоки тепла и импульса,

масштабы температурных ( $T^*$ ) и ветровых ( $V^*$ ) флуктуаций, масштаб  $L$  и число  $\zeta$  Монина–Обухова ( $\zeta = z/L$ ,  $z$  – высота), структурные характеристики флуктуаций температуры  $C_T^2$  ( $\text{град}^2 \cdot \text{см}^{-2/3}$ ), продольной составляющей скорости ветра  $C_V^2$  ( $(\text{м/с})^2 \cdot \text{см}^{-2/3}$ ), акустического  $C_{na}^2$  ( $\text{м}^{-2/3}$ ) и оптического  $C_n^2$  ( $\text{см}^{-2/3}$ ) показателей преломления.

### **3.2. Экспериментальные наблюдения изменения типа турбулентности в высокогорных обсерваториях**

В первую очередь нас интересуют особенности формирования когерентной турбулентности в атмосфере, поскольку ранее нами было показано [40–43, 47–51], что в открытой атмосфере над территориями высокогорных обсерваторий часто наблюдаются протяженные области, в которых определяющее влияние имеет одна когерентная структура (области когерентной турбулентности).

В условиях незамутненной атмосферы качество изображения, принятого телескопом, определяется в основном атмосферной турбулентностью, которая вносит случайные искажения в фазовый фронт волны. Нами теоретически и экспериментально установлено [8, 40–47, 49–53], что при наличии в атмосфере крупных когерентных структур (области когерентной турбулентности) наблюдается эффект ослабления фазовых флуктуаций светового излучения по сравнению с колмогоровской турбулентностью вследствие обедненности мелкомасштабными неоднородностями. Ослабление фазовых флуктуаций проявляется в существенном уменьшении флуктуаций дрожания астрономических изображений. Поэтому с целью повышения качества изображений для установки наземных астрономических телескопов можно рекомендовать районы, над которыми во время измерений имеются области когерентной турбулентности [40, 42].

Ослабление фазовых флуктуаций светового излучения зарегистрировано нами в серии оптико-метеорологических измерений 2010–2019 гг. [40–46].

В ССО Института солнечно-земной физики СО РАН измерения проводились на АСТ. Результаты измерений параметров турбулентности, произведенных в 2005–2019 гг. непрерывно (через каждые 15 мин) в течение нескольких недель, показывают, что ветер над территорией ССО имеет выделенное среднее преимущественное направление по линии «север–юг» по аналогии с бризовыми ветрами.

Севернее обсерватории поперек среднего направления ветра протянулся горный хребет Восточных Саян (рис. 6, *a*). Высота горы Часовые Сопки, на вершине которой находится обсерватория, составляет 2000 м. На 700 м ниже, между ней и склонами Саянских гор, протекает р. Иркут. Средняя высота северных гор напротив обсерватории – ~ 2400 м, а расстояние до них на высоте обсерватории – ~ 14 км. С южной стороны от ССО находится достаточно ровная местность и крупное, более 100 км



*a*



*б*

Рис. 6. Профиль поверхности по линии направления средних ветров в ССО: *a* – горный хребет Восточного Саяна севернее ССО; *б* – ровная местность и оз. Хубсугул южнее ССО

в длину, оз. Хубсугул (рис. 6, *б*). При южном ветре (со стороны оз. Хубсугул, ровная подстилающая поверхность) спектры турбулентности в атмосфере ( $W_T(f)$ ) над территорией обсерватории обычно остаются колмогоровскими ( $W_T \sim f^{-5/3}$ ). При противоположном направлении ветра со стороны Саян инерционные интервалы спектров турбулентности обычно имеют « $-8/3$ »-асимптотики ( $W_T \sim f^{-8/3}$ ), что является признаком когерентной структуры. Таким образом, воздушные массы, стекая с холодного саянского горного массива к р. Иркут и закручиваясь склонами горы Часовые Сопки, образуют за препятствием в атмосфере над обсерваторией крупную долгоживущую когерентную структуру (или серию достаточно крупных когерентных структур, типа дорожки фон Кармана), внутрь которой попадают телескопы ССО. Время ее жизни составило 6–28 мин.

Аналогичная ситуация наблюдалась авторами вблизи приемной апертуры Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ), установленного на вершине горы вблизи береговой кромки оз. Байкал [8, 42, 95–97]. Среднее направление ветра (отсчитывается от севера через восток) вблизи БСВТ ночью и днем различается примерно на  $180^\circ$  (рис. 7). Утром и вечером, при нестабильном направлении бризовых ветров и устойчивой стратификации, сглаженные временные частотные спектры температуры имеют в основном « $-5/3$ »-асимптотики, соответствующие колмогоровской турбулентности (треугольники на рис. 7). При постоянном направлении ветра в ночное и дневное время в полученных данных доминируют спектры с « $-8/3$ »-асимптотиками (большие кружки на рис. 7, когерентная турбулентность), т.е. при стабильном ветре вследствие

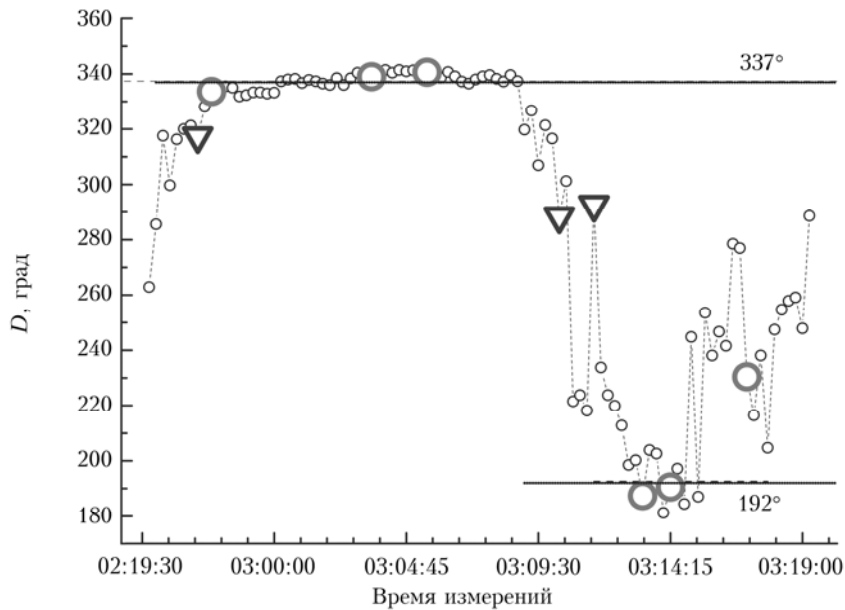


Рис. 7. Среднее направление ветра  $D$ , оз. Байкал, 2007 г. [8, 42, 97]. Треугольники соответствуют колмогоровской турбулентности, светлые большие кружки – когерентной турбулентности; маленькие кружки – точки измерений

неоднородности берегового рельефа на высоте приемного зеркала БСВТ возникает когерентная турбулентность.

Таким образом, полученные нами экспериментальные данные показывают, что в горах в стабильных метеоусловиях, характеризующихся постоянным направлением среднего ветра (ночью и днем), за крупными неоднородностями рельефа или искусственными препятствиями для атмосферных потоков формируются области когерентной турбулентности. Изменение же преимущественно наблюдаемого типа турбулентности (колмогоровская или когерентная турбулентность) происходило в зависимости от времени суток и направления среднего ветра.

### 3.3. Измерения интегральной интенсивности атмосферной турбулентности

Интенсивность атмосферной турбулентности определяется, как известно, параметрами структурных функций флуктуаций температуры и показателя преломления –  $C_T^2$  и  $C_n^2$ . На трассах с внеатмосферными оптическими источниками большую роль играют высотные профили этих характеристик, например  $C_n^2(h)$ , где  $h$  – высота над подстилающей поверхностью.

В нашей работе [42] приведены результаты оптических измерений интегральной интенсивности атмосферной турбулентности по данным высокогорных оптических измерений дрожания изображения края солнечного диска.

Для случая колмогоровской (некогерентной) турбулентности дисперсия дрожания изображений  $\sigma_\alpha^2$  выражается через интегральное значение  $I_{\text{кол}}$  структурной характеристики показателя преломления  $C_n^2$  известным образом [38]:

$$\sigma_\alpha^2 = 4,51 a_t^{-1/3} \sec \theta \cdot I_{\text{кол}}, \quad I_{\text{кол}} = \int_0^\infty dh C_n^2(h), \quad (12)$$

где  $a_t$  – радиус входной апертуры телескопа;  $\theta$  – зенитный угол наблюдаемого объекта, отсчитываемый в месте расположения приемника от направления в зенит. Для каждого значения угла  $\theta$  величина  $I_{\text{кол}}$  определяет интегральную интенсивность атмосферной колмогоровской турбулентности на оптических трассах заданного наклона. Формула (12) позволяет по измеренным  $\sigma_\alpha^2$  восстанавливать  $I_{\text{кол}}$ .

В когерентной турбулентности спектр атмосферной турбулентности отличается от случая колмогоровской (некогерентной) турбулентности [7, 8, 40–43, 47–53]. Поэтому выражение для дисперсии  $\sigma_\alpha^2$  изменится. Для измерений использовано приведенное в [42] оценочное выражение дисперсии  $\sigma_\alpha^2$  через интегральное значение  $I_{\text{ког}}$  структурной характеристики  $C_n^2$  в когерентной турбулентности

$$\sigma_\alpha^2 = 8,06 \cdot 4 I_0^{-1/3} \sec \theta \cdot I_{\text{ког}}, \quad I_{\text{ког}} = \int_0^\infty dh C_n^2(h), \quad (13)$$

где  $L_0 = L_0(h_0)$  – внешний (экспоненциальный [42]) масштаб турбулентности на высоте центра приемного зеркала над подстилающей поверхностью  $h_0$ . Основное отличие формулы (13) от выражения для случая колмогоровской турбулентности (12) в том, что в (13) вместо  $a_t$  появляется внешний масштаб турбулентности  $L_0$  и, следовательно,  $\sigma_\alpha^2$  не зависит от  $a_t$ .

Выражения для интегральных интенсивностей колмогоровской  $I_{\text{кол}}$  и когерентной  $I_{\text{ког}}$  турбулентностей в (12) и (13) по форме одинаковы, однако можно ожидать, что высотные профили  $C_n^2(h)$  для турбулентностей разных типов (колмогоровской и когерентной) будут отличаться друг от друга.

На рис. 8 приведены результаты оптических измерений  $I_{\text{кол}}$ , осредненные по четырем сеансам измерений (треугольники) [42]. Измерения были выполнены для пяти различных диаметров приемного зеркала (апертуры) АСТ: 5, 10, 30, 50 и 80 см, и для двух различных угловых размеров приемной щели регистратора датчика: 25" и 10". Осуществлялся контроль зенитного угла положения Солнца. Сплошной линией на рис. 8 показана соответствующая теоретическая зависимость величины  $I_{\text{кол}}$  от диаметра приемного зеркала телескопа  $D$ .

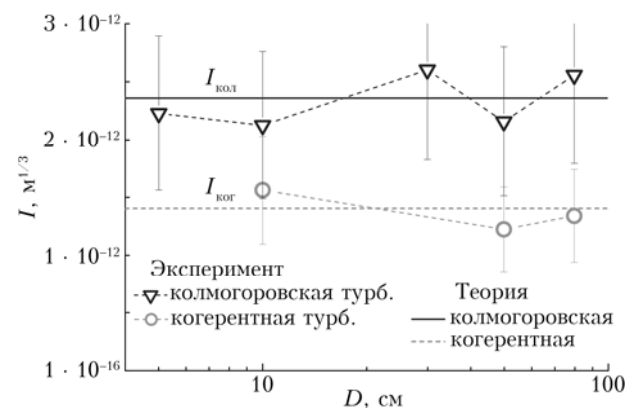


Рис. 8. Интегральная интенсивность атмосферной когерентной турбулентности  $I_{\text{ког}}$  и колмогоровской некогерентной турбулентности  $I_{\text{кол}}$  над территорией ССО в зависимости от диаметра приемной апертуры  $D$ ; июнь 2010 г.

Результаты измерений (рис. 8) показывают, что присутствие в атмосфере крупных когерентных структур слабо влияет на значения интегральной интенсивности турбулентности ( $I_{\text{кол}} \approx 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{1/3}$ ,  $I_{\text{ког}} \approx 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{1/3}$ ). Этого следовало ожидать, так как интегральная интенсивность накапливается вдоль всей оптической трассы. При этом вариации высотного профиля структурной характеристики показателя преломления, возникающие за счет отклонения турбулентности от колмогоровской, сглаживаются. В то же время когерентная турбулентность обычно обеднена мелкомасштабными неоднородностями, которые увеличивают  $C_n^2$ . Поэтому в среднем интегральная интенсивность когерентной турбулентности оказывается почти вдвое меньше, чем интенсивность некогерентной колмогоровской турбулентности.



### 3.4. Измерения дисперсии углового дрожания изображения края солнечного диска

В этом разделе, который носит обзорный характер, мы приведем результаты измерений дисперсии углового дрожания изображения края солнечного диска, выполненных авторами настоящей статьи в течение ряда лет (2010–2015 гг.).

**Эксперименты 2010 г.** Основные осредненные параметры оптического эксперимента 2010 г.: зенитный угол наблюдаемого объекта  $\theta \approx 55^\circ$ ; структурная характеристика  $C_n^2 = 4,2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$  на высоте 4,5 м от подстилающей поверхности; угловой радиус астрономического источника (край солнечного диска), соответствующий предельному угловому разрешению используемого приемника,  $\alpha \approx 0,1''$ .

Результаты оптических и параллельных метеорологических измерений показали (рис. 9) [42–44], что когда в атмосфере присутствуют крупные когерентные структуры ( $W_T \sim f^{-8/3}$ , когерентная турбулентность), то наши данные совпадают с когерентной теорией ( $\sigma_\alpha \sim \text{const}$ , точка 2 на рис. 9).

При отсутствии в атмосфере крупных структур ( $W_T \sim f^{-5/3}$ , некогерентная турбулентность) наши результаты совпадают с традиционной некогерентной теорией (наклонная линия и точки 1, 3–5 на рис. 9). Как видно из рис. 9, стандартное (среднеквадратическое) отклонение дрожания изображения края солнечного диска в когерентной турбулентности значительно меньше (практически в 2 раза), чем в случае колмогоровской турбулентности.

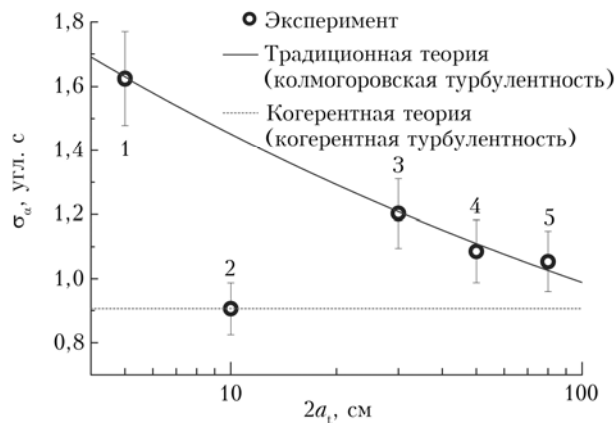


Рис. 9. Среднеквадратическое отклонение  $\sigma_\alpha$  дрожания астрономического изображения края солнечного диска в зависимости от диаметра апертуры телескопа  $2a_t$  (Саяны, 19.06.2010 г.). Для экспериментальной точки 2:  $2a_t = 10 \text{ см}$  —  $W_T \sim f^{-8/3}$ , для других точек —  $W_T \sim f^{-5/3}$

**Эксперименты 2011 г.** В 2011 г. мы повторили аналогичные проведенным в 2010 г. экспериментальные исследования эффекта ослабления флуктуаций света в когерентной турбулентности [40, 42]:  $\theta \approx 50^\circ$ ;  $C_n^2 = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$  на высоте 4,5 м от подстилающей поверхности;  $\alpha \approx 0,1''$ .

Результаты астрономических и параллельных метеорологических измерений подтвердили (рис. 10),

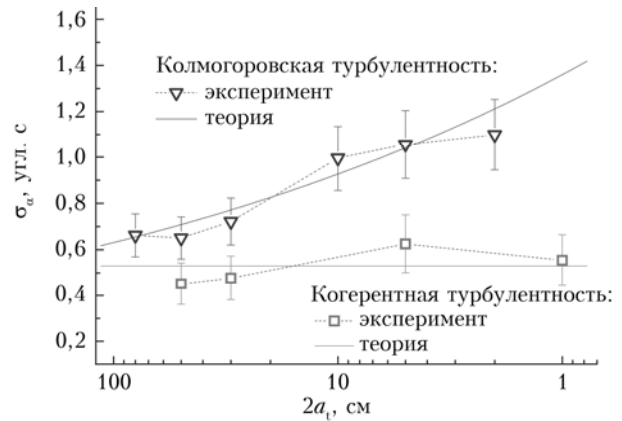


Рис. 10. Среднеквадратическое отклонение  $\sigma_\alpha$  дрожания астрономического изображения края солнечного диска в зависимости от диаметра апертуры телескопа  $2a_t$  (Саяны, 4.08.2011 г.)

что дисперсия дрожания изображения края солнечного диска в когерентной турбулентности ( $\sigma_\alpha \sim \text{const}$ , квадраты на рис. 10), как и в эксперименте 2010 г., для одинакового размера апертуры значительно меньше, чем в случае колмогоровской турбулентности (наклонная теоретическая линия и треугольники на рис. 10). При отсутствии в атмосфере крупных структур (колмогоровская турбулентность) наши результаты совпадают с колмогоровской теорией.

**Эксперименты 2013 г.** В 2013 г. были продолжены исследования эффекта ослабления флуктуаций света в когерентной турбулентности [41, 45, 46]. Основные осредненные параметры экспериментов:  $\theta \approx 60^\circ$ ;  $C_n^2 = 1,7 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$  на высоте 4,5 м от подстилающей поверхности; средняя скорость приземного ветра 6 м/с;  $\alpha = 0,1 \div 1,5''$ .

Условия проведения экспериментов в 2013 г. существенно отличались от условий 2010–2012 гг. [45]. В отличие от предыдущих летних измерений эксперимент 2013 г. проводился осенью в условиях неустойчивого снежного покрова и сильного ветра на территории высокогорной обсерватории ССО.

Результаты астрономических и параллельных метеорологических измерений показали (рис. 11), что, когда в атмосфере регистрируется когерентная турбулентность, наши данные совпадают с когерентной теорией ( $\sigma_\alpha \approx \text{const}$ , светлые кружки и линия 3 на рис. 11). В случае колмогоровской турбулентности результаты для точечного источника ( $\alpha = 0,1''$ ) совпадают с традиционной колмогоровской теорией (темные треугольники и линия 1 на рис. 11).

Теоретическая кривая 2 на рис. 11 построена для колмогоровской турбулентности с учетом регуляризации случайной сингулярной фазы некогерентного протяженного источника. В этом случае, как известно [45, 46],  $\sigma_\alpha$  углового дрожания астрономического изображения приближенно представляется в виде

$$\sigma_\alpha = \sigma_{\alpha, \text{сф}} f(a_t), \quad f(a_t) = \left[ 1 + (4/9)(a h_e \sec \theta / a_t)^2 \right]^{-1/12}, \quad (14)$$

где  $\sigma_{\alpha, \text{сф}}$  — стандартное отклонение углового дрожания изображения сферической волны (точечного источника);  $h_e$  — эффективная толщина оптически активного слоя турбулентной атмосферы ( $h_e \approx 3,2$  км). Здесь функция  $f(a_t)$  учитывает в дрожании изображений отклонения реального протяженного некогерентного источника (край солнечного диска) от точечного (сферической волны).

Из рис. 11 видно удовлетворительное совпадение регуляризованной теории для колмогоровской турбулентности с экспериментом. В соответствии с данными рис. 11 дрожание изображения края солнечного диска ( $\alpha \neq 0$ ) при уменьшении диаметра приемника  $2a_t$  стремится к постоянной величине. Из рис. 11 также следует, что стандартное (средне-квадратическое) отклонение дрожания изображения края солнечного диска в когерентной турбулентности для одной и той же апертуры оказывается значительно меньшим, чем в случае колмогоровской (некогерентной) турбулентности (для небольших приемников — более чем в 2 раза).

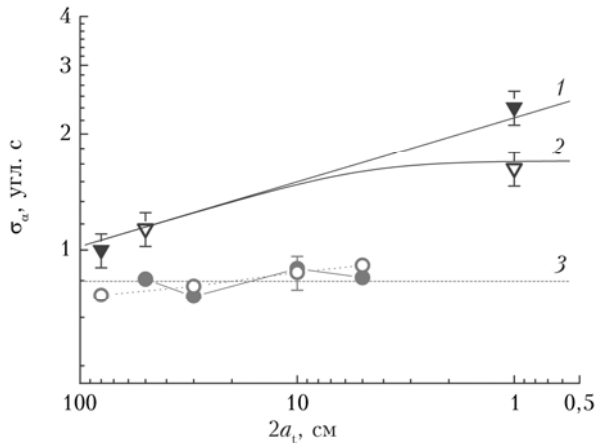


Рис. 11. Стандартное отклонение  $\sigma_{\alpha}$  углового дрожания астрономического изображения края солнечного диска в зависимости от диаметра апертуры телескопа  $2a_t$  (Саяны, 24.09.2013 г.). Кружки соответствуют когерентной турбулентности, треугольники — колмогоровской турбулентности; темные кружки и треугольники — точечный источник ( $\alpha = 0,1''$ ), светлые кружки и треугольники — протяженный некогерентный источник ( $\alpha = 1,1''$ ); 1 — традиционная колмогоровская, 2 — регуляризованная колмогоровская, 3 — когерентная неколмогоровская теории

Таким образом, при наличии в атмосфере когерентной турбулентности флуктуации дрожания оптических изображений существенно уменьшаются. Это повышает качество астрономических изображений.

Эксперимент 2013 г. расширил наше понимание влияния когерентной турбулентности на распространение оптического излучения в турбулентной среде. В 2013 г. удалось зарегистрировать больше данных для когерентной турбулентности (восемь точек для дисперсии дрожания изображений вместо четырех в 2011 г. и одной точки в 2010 г.).

В предыдущих летних метеорологических измерениях 2010–2012 гг. долгоживущая (со временем

жизни 20–120 мин) когерентная турбулентность над территорией ССО регистрировалась, как правило, при северном ветре (с гор Саянского хребта). Летом такой ветер обычно наблюдается ночью. Поэтому ночные летние астрономические наблюдения здесь можно было считать предпочтительными. Однако ночных летних оптических измерений в 2010–2012 гг. не проводилось, только дневные. Днем регистрировались обычно южный ветер (со стороны оз. Хубсугул, Монголия) и короткоживущая когерентная турбулентность (со временем жизни 6–14 мин). Поэтому в дневных летних оптических измерениях 2010–2012 гг. зарегистрировано немного данных  $\sigma_{\alpha}$  для когерентной турбулентности.

В эксперименте 2013 г., проводившемся в условиях снежного покрова и сильного ветра (по существу, в условиях перехода от осени к зиме), короткоживущая (со временем жизни 2–4 мин) когерентная турбулентность возникала, как и летом, при южном ветре (со стороны оз. Хубсугул), который в ССО наблюдается обычно днем. В то же время измерения предыдущих лет показали, что при южном ветре днем в обсерватории обычно наблюдается колмогоровская турбулентность. Однако по сравнению с летними измерениями 2010–2012 гг. в осенне-зимних измерениях 2013 г. значительно возросла частота появления короткоживущей когерентной турбулентности (по-видимому, за счет сильного ветра, быстрее переносящего сформированную над оз. Хубсугул смесь одиночных когерентных структур). Поэтому в оптических измерениях 2013 г. зарегистрировано значительно больше данных  $\sigma_{\alpha}$  для когерентной турбулентности.

В наших наблюдениях 2013 г. при стабильных метеорологических условиях и ветре со стороны ровной подстилающей поверхности временной период присутствия (время жизни) когерентной турбулентности в атмосфере, за который она не меняется на колмогоровскую турбулентность, составляет от 10 до 26 мин (таблица). При этом время жизни колмогоровской турбулентности в 2–4 раза меньше и составляет 6–7 мин, и было зарегистрировано наибольшее количество когерентных точек (8 точек) в измерениях. Для измерений прошлых лет времена жизни турбулентности разных типов приведены в таблице. В 2010 г. время жизни колмогоровской турбулентности приблизительно в 2 раза больше времени жизни когерентной турбулентности (зарегистрирована всего одна когерентная точка в измерениях). Для измерений 2011 г. времена жизни колмогоровской и когерентной турбулентности оказались сравнимыми (см. таблицу, при этом зарегистрированы 4 когерентных и 6 колмогоровских точек).

**Эксперименты 2014 г.** В наблюдениях 2014 г. удалось зарегистрировать *нестандартное* для дневного времени направление ветра со стороны Саянских гор. Измерения производились после полудня и представлены на рис. 12.

За время измерений (около часа) произошла смена типа турбулентности с когерентной (круж-

ки) на колмогоровскую (треугольники). Как видно из рис. 12, стандартное отклонение дрожания изображения края солнечного диска в когерентной турбулентности оказывается меньшим по сравнению с теоретической кривой 1 для случая колмогоровской турбулентности. Это подтверждает сделанные нами ранее выводы [40–43, 47–52] об ослаблении фазовых флуктуаций оптического излучения в когерентной турбулентности по сравнению с колмогоровской (вследствие обедненности мелко-масштабными неоднородностями). Поэтому с целью повышения качества изображений, для установки наземных астрономических телескопов можно рекомендовать районы, над которыми во время измерений есть области когерентной турбулентности.

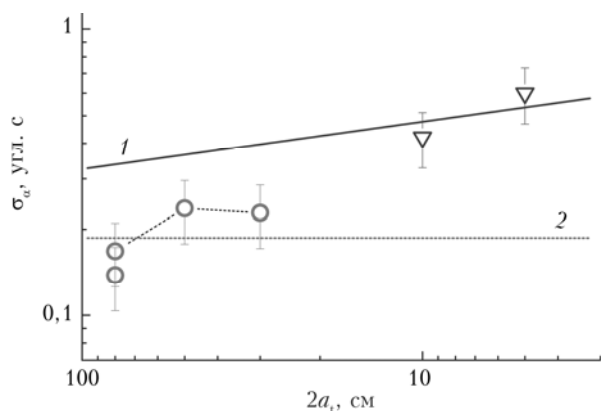


Рис. 12. Стандартное отклонение  $\sigma_\alpha$  дрожания изображения края солнечного диска в зависимости от диаметра апертуры телескопа  $2a_t$  (Саяны, 12.08.2014 г.): 1 – колмогоровская, 2 – когерентная теории

В наших наблюдениях (12.08.2014 г.) при стабильных метеорологических условиях и ветре со стороны Саянского хребта время жизни когерентной турбулентности в атмосфере, за который она не меняется на колмогоровскую турбулентность, составило около 18 мин. При этом время жизни колмогоровской турбулентности в 2–3 раза меньше и составляет 7 мин. В то же время в наблюдениях 13.08.2014 г. при стабильном направлении ветра со стороны ровной подстилающей поверхности время жизни колмогоровской турбулентности оказалось значительно больше, чем когерентной (таблица).

**Эксперименты 2015 г.** В оптико-метеорологических измерениях в 2015 г. нами установлено, что над территорией ССО наблюдается перемежаемость (периодическая смена) типа турбулентности, когда когерентная турбулентность сменяется колмогоровской. Когерентная турбулентность в дневных измерениях обычно возникала при среднем направлении ветра с севера (со стороны гор Саянского хребта, через глубокую долину р. Иркут). Время ее жизни составляло 6–28 мин. При отсутствии климатических аномалий (в 2015 г., например, в виде исключения была зарегистрирована такая трехдневная аномалия) северное направление ветра в ССО наблюдается, как правило, ночью. При противоположном, южном направлении ветра (со стороны ровной подстилающей поверхности и крупного оз. Хубсугул) регистрируется в основном колмогоровская турбулентность со временем жизни 7–35 мин. В этом случае часто возникала также короткоживущая когерентная турбулентность со временем жизни 2–4 мин. Южное направление ветра в ССО наблюдается, как правило, днем. Как видно из рис. 13, дисперсия дрожания изображения для когерентной турбулентности оказывается меньшей, чем для колмогоровской (в 2–4 раза в зависимости от диаметра телескопа и времени наблюдений).

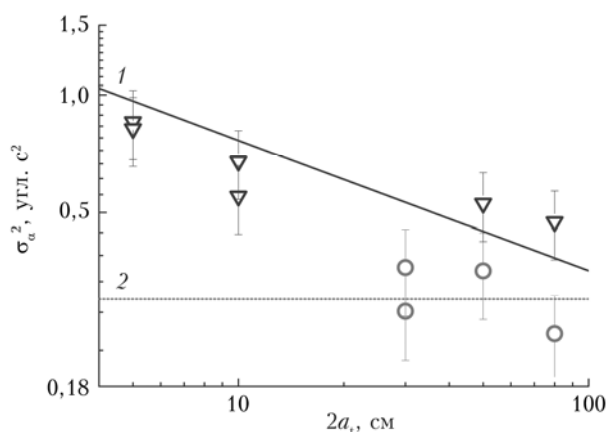


Рис. 13. Дисперсия  $\sigma_\alpha^2$  углового дрожания изображения края солнечного диска в зависимости от диаметра апертуры приемного телескопа  $2a_t$ . Экспериментальные кружки – когерентной турбулентности, треугольники – колмогоровской (Саяны, 15.07.2015 г.): 1 – колмогоровская, 2 – когерентная теории

**Зарегистрированные в оптико-метеорологических измерениях времена жизни турбулентности разного типа ( $V$  – скорость горизонтального ветра,  $D$  – направление,  $T$  – температура)**

Дата измерений	$V$ , м/с	$T$ , °С	$D$ , град	Время непрерывной регистрации, мин	
				колмогоровской турбулентности	когерентной турбулентности
19.06.2010 г.	4,4	19,0	190–230	21	10
04.08.2011 г.	1,9	19,5	20–40	8–15	7–12
14.07.2012 г.	1,7	9,4	40–70	13	29
25.09.2013 г.	6,0	8,5	180–200	6–7	10–26
12.08.2014 г.	1,7	17,7	5–79	7	18
15.07.2015 г.	2	17,6	52	15	28

В эксперименте 2015 г. выявлены времена и места возникновения областей когерентной турбулентности, установлены их связи с типом подстилающей поверхности и направлением скорости ветра, а также с типом микроклимата региона в целом. С целью повышения качества изображений для установки наземных астрономических телескопов в [8, 40, 42, 45] рекомендованы районы, над которыми имеются области когерентной турбулентности.

В целом в условиях перехода от осени к зиме в ССО длительные дневные астрономические наблюдения сопровождаются частым переходом от колмогоровской к когерентной турбулентности. Такой переход, соответствующий смене типа турбулентности, дает перемежаемость в дрожании астрономических изображений, что проявляется в частой смене интервалов сильных и слабых дрожаний изображений. Так как когерентная турбулентность приводит к улучшению качества оптических изображений [40–43, 47], этот эффект можно рассматривать как положительный для короткоэкспозиционных измерений, когда из серии полученных изображений можно выбрать наиболее качественные.

#### 4. Обсуждение результатов

Итоги экспериментов 2010–2015 гг. подведены в таблице, где указаны зарегистрированные в оптико-метеорологических измерениях времена жизни (по сеансам измерений) турбулентности разного типа.

Временем жизни турбулентности того или иного типа называется время присутствия в измерениях (или время непрерывной регистрации) турбулентности конкретного типа. Тип регистрируемой турбулентности определялся по степенному наклону инерционного интервала турбулентного спектра случайных флуктуаций температуры воздуха. Так, для колмогоровской турбулентности убывание зарегистрированного спектра соответствовало «закону  $-5/3$ », а для когерентной турбулентности – «закону  $-8/3$ ». При этом экспериментальные выборки случайной температуры (длина каждой выборки составляла 3 мин) следовали одна за другой с интервалом 2 мин. Половина этого интервала (1 мин) может служить оценкой абсолютной погрешности измерения времени жизни.

Из данных таблицы видно, что при направлении ветра со стороны ровной подстилающей поверхности (южные направления,  $\sim 180^\circ$ ) время жизни колмогоровской турбулентности более чем в 2 раза больше времени жизни когерентной турбулентности. При противоположном ветре (северные направления,  $\sim 0^\circ$  или  $\sim 360^\circ$ ) со стороны Саянских гор больше (до 2–3 раз) становится период присутствия когерентной турбулентности. Таким образом, над территорией ССО появление турбулентности того или иного типа в большей степени определяется направлением ветра: при южных направлениях чаще обнаруживается колмогоровская

турбулентность, при северных – когерентная турбулентность.

Отметим также, что в 2013 г. были зарегистрированы большие величины вертикальных составляющих скорости, которые обычно соответствуют присутствию в приземном слое достаточно крупных когерентных структур.

Горизонтальную протяженность областей когерентной турбулентности можно приближенно оценить на основании продолжительности времени регистрации и средней скорости потока; так, например (см. таблицу, 2010 г.), протяженность области со временем жизни около 10 мин при средней скорости потока 4,4 м/с составляет  $\sim 2600$  м.

Вертикальный размер таких анизотропных вихрей будет меньше (за счет трения о подстилающую поверхность), но приблизительно такого же порядка величины. Отсюда следует, что вертикальные размеры областей когерентной турбулентности превышают высоты башен телескопов, вблизи которых проведены наши полевые измерения. В свою очередь, это означает, что телескопы попадают внутрь областей когерентной турбулентности, вследствие чего качество астрономических изображений в них улучшается.

#### Заключение

Таким образом, теоретический анализ и эксперименты подтверждают присутствие в атмосфере высокогорных обсерваторий крупных когерентных структур (области когерентной турбулентности), в которых флуктуации оптического излучения существенно уменьшаются [40–43, 47–52]. Поэтому для установки наземных телескопов можно рекомендовать районы, над которыми во время измерений имеются крупные когерентные структуры. При этом, как выяснилось, сами крупные когерентные структуры можно обнаруживать с помощью измерений характеристик дрожания астрономических изображений.

Анализ и сравнение результатов проведенных измерений позволили сделать следующие выводы.

1. В оптико-метеорологических измерениях установлено, что при наличии в турбулентной атмосфере крупных когерентных структур наблюдается периодическая смена типа турбулентности, когда когерентная турбулентность сменяется (перемежается) колмогоровской. Данные таблицы иллюстрируют проявление эффекта перемежаемости типов турбулентности.

2. В оптических измерениях перемежаемость типов турбулентности проявляется в виде эффекта перемежаемости дрожания астрономических изображений. Эффект перемежаемости дрожания *заключается* в периодическом ослаблении и усилении (с интервалами от 6 до 39 мин) фазовых флуктуаций оптического излучения, что проявляется в периодическом ослаблении и усилении дрожания изображений. *Для существования* этого эффекта *необходимо*, чтобы в атмосфере были сформирова-

ны достаточно долгоживущие (и достаточно крупные) смежные области с когерентной и колмогоровской турбулентностями. Эффект *возникает* при последовательном переносе ветром как единого целого указанных смежных областей поперек оптической трассы «источник–приемник» и *наблюдается* при непрерывной оптической регистрации дрожания изображений в фиксированной приземной точке.

Измерения 2010–2015 гг. [40–53] подтверждают существование эффекта перемежаемости дрожания и уточняют условия его проявления. Как видно из таблицы, процесс возникновения и время жизни областей когерентной турбулентности, перемещающихся затем через точку наблюдения ветром, зависят от времени года, направления ветра и типа подстилающей поверхности.

3. *Эффект перемежаемости типов турбулентности*, как видно из описания (и приведенных выше данных измерений 2010–2015 гг.), *характеризует локальную структуру турбулентности над конкретным регионом*. В сплошном турбулентном поле имеются долгоживущие области изотропной колмогоровской турбулентности, в которых продукты распада близких по размерам когерентных структур хорошо перемешаны, и долгоживущие области неізотропной когерентной турбулентности с преобладающим влиянием одной крупной когерентной структуры (внутри таких областей продукты распада соседних структур можно считать малыми несущественными примесями). Вся эта совокупность смежных областей, имеющих турбулентность двух разных типов (колмогоровская и когерентная), переносится ветром как единое целое. Если время регистрации характеристик турбулентности (в какой-либо выбранной точке) меньше времени существования указанных областей, то экспериментально можно обнаружить изменение типа турбулентности. Из-за ветрового переноса и сравнительно больших времен жизни областей, имеющих турбулентность разного типа, в измерениях наблюдается чередование (перемежаемость) зарегистрированного типа турбулентности. На практике перемежаемость типа турбулентности обнаруживается одновременно при регистрации как метеорологических (температура и компоненты скорости), так и оптических (дрожание изображений) характеристик турбулентности.

4. Наличие в местах размещения астрономических телескопов горных массивов приводит к тому, что обычно имеется выделенное направление среднего ветра над территорией обсерваторий, обусловленное, подобно бризовым ветрам, разницей температур (градиентом) между горным массивом и долиной или определенное имеющимися рельефными «руслами» для воздушных масс в приземном слое. Смена направления ветра вдоль выделенного устойчивого направления на обратное направление приводит к смене приносимых на территорию обсерватории воздушных масс и смене типа наблюдаемой турбулентности. Причиной изменения направления ветра может быть, например, смена дня

и ночи, изменение облачности, метеорологических условий и т.д. Преимущественно когерентный тип турбулентности регистрируется при направлении ветра со стороны гор, а преимущественно колмогоровская турбулентность – при ветре со стороны ровной подстилающей поверхности.

Так, измерения показывают, что над территорией ССО когерентная турбулентность возникает, как правило, при северном ветре (со стороны гор Саянского хребта, через глубокую долину р. Иркут). Летом такой ветер обычно наблюдается ночью. Поэтому ночные наблюдения здесь предпочтительнее. Над территорией ССО при южной ветре (со стороны Монголии, где сравнительно ровная подстилающая поверхность) время жизни областей когерентной турбулентности (в течение одного сеанса измерений) составляет 2–4 мин, а при северном ветре (с гор Саянского хребта) 6–28 мин. При противоположном южном направлении ветра (со стороны ровной подстилающей поверхности и оз. Хубсугул; наблюдается чаще всего днем) регистрируется в основном колмогоровская турбулентность со временем жизни 7–35 мин.

5. Как показано выше, башни телескопов попадают внутрь областей когерентной турбулентности, так как высоты башен меньше вертикальных размеров областей когерентной турбулентности. Это приводит к улучшению качества астрономических изображений.

6. Обстоятельства, установленные метеорологическими измерениями, подтверждаются одновременными оптическими измерениями на телескопах, что позволило выработать практические рекомендации (см., например, [42]) по наиболее благоприятному режиму проведения наблюдений в исследованных астрономических обсерваториях.

7. Как выяснилось, сами крупные когерентные структуры (области когерентной турбулентности), которые находятся на пути распространяющегося оптического излучения (пересекаются оптической трассой «источник–приемник»), можно обнаруживать с помощью измерений характеристик дрожания астрономических изображений.

8. Один из важных результатов выполненных обзоров заключается в развитии представлений о структуре турбулентности. Физической расшифровкой гипотезы Э. Хопфа (1948) о конечности аттракторов в фазовом пространстве решений уравнений Навье–Стокса является сформулированное А.С. Мониным и А.М. Ягломом (1991, 1992) представление о турбулентности как о пространственно-временном хаосе конечного числа взаимодействующих когерентных структур. В работах авторов настоящей статьи (2008–2019) независимо показано, что атмосферную турбулентность можно рассматривать как некогерентную смесь различных когерентных структур с несоизмеримыми частотами главных энергонесущих вихрей. Таким образом, результаты авторов фактически являются доказательством гипотезы Э. Хопфа в ее интерпретации, сформулированной А.С. Мониным и А.М. Ягломом. Совпадение научных взглядов

на структуру турбулентности, сформированных в разные исторические периоды, дает основание утверждать, что представление о турбулентности, как о пространственно-временном хаосе конечного числа взаимодействующих когерентных структур, близко к истинному. При этом «хаос» турбулентности является в значительной степени детерминированным.

Исследования проведены при финансовой поддержке проекта П.10.3.5 (№ АААА-А17–117021310146-3).

1. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности: в 2-х ч. М.: Наука, 1965. Ч. 1. 640 с.
2. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности: в 2-х ч. М.: Наука, 1967. Ч. 2. 720 с.
3. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 1. СПб.: Гидрометеониздат, 1992. 696 с.
4. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 2. СПб.: Гидрометеониздат, 1996. 742 с.
5. Рейнольдс О. Динамическая теория движения несжимаемой вязкой жидкости и определение критерия // Проблемы турбулентности. М.: ОНТИ, 1936. С. 185–227. Перевод изд.: Reynolds O. On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion. 1894.
6. Фридман А.А., Келлер Л.В. Дифференциальные уравнения турбулентного движения сжимаемой жидкости // Избранные труды. М.: Наука, 1966. С. 45–57. Перевод изд.: Friedman A., Keller L. Differentialgleichungen für die turbulente Bewegung einer kompressiblen Flüssigkeit. Delft, 1925.
7. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. The emergence and evolution of the concept “coherent turbulence” // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1499, N 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/1499/1/012005.
8. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Формирование турбулентности в астрономических обсерваториях юга Сибири и Северного Кавказа // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 3. С. 228–246; Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Formation of turbulence at astronomical observatories in Southern Siberia and North Caucasus // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 4. P. 464–482. DOI: 10.15372/AOO20190309.
9. Tokovinin A. Where is the surface-layer turbulence? // Proc. SPIE. 2010. V. 7733. P. 77331N. DOI: 10.1117/12.856409.
10. Гурьянов А.Э. О пульсациях температуры в воздушной среде вблизи телескопа ночью // Астроклимат и эффективность телескопов. Л.: Наука, 1984. С. 164–168.
11. Шлихтинг Г. Возникновение турбулентности. М.: ИИЛ, 1962. 204 с. Перевод изд.: Schlichting H. Entstehung der turbulenz. Heidelberg, 1959.
12. Драйден Х.Л. Переход ламинарного течения в турбулентное // Турбулентные течения и теплопередача. М.: ИЛ, 1963. С. 9–82. Перевод изд.: Dryden H.L. Transition from Laminar to Turbulent Flow, 1959.
13. Stuart J.T. Hydrodynamic stability // Laminar Boundary Layers. Oxford, UK: Clarendon Press. 1963. P. 492–579.
14. Линь Ц.Ц. Теория гидродинамической устойчивости. М.: ИЛ, 1958. 194 с. Перевод изд.: Lin C.C. The Theory of Hydrodynamic Stability. Cambridge, 1955.
15. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. England: Oxford University Press, 1961. 652 p.
16. 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. DOI: 10.1098/rspl.1883.0018.
17. Schiller L. Neue quantitative versuche zur turbulenzentstehung // ZAMM J. Appl. Math. Mech. / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1934. V. 14, N 1. P. 36–42. DOI: 10.1002/zamm.19340140105.
18. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: ИИЛ, 1956. 528 с. Перевод изд.: Schlichting H. Grenzschicht-Theorie. Karlsruhe, 1951.
19. Letellier C. Intermittency as a transition to turbulence in pipes: A long tradition from Reynolds to the 21st century // Comptes Rendus Mécanique. 2017. V. 345, iss. 9. P. 642–659. DOI: 10.1016/j.crme.2017.06.004.
20. Frisch U. Turbulence: The Legacy of A.N. Kolmogorov. Cambridge: University Press, 1995. 313 p.
21. Fage A., Townend H.C.H. An examination of turbulent flow with an ultramicroscope // Proc. Roy. Soc. A. 1932. V. 135, N 828. P. 656–677. DOI: 10.1098/rspa.1932.0059.
22. Sandborn V.A. Measurements of intermittency of turbulent motion in a boundary layer // J. Fluid Mech. 1959. V. 6, N 2. P. 221–240. DOI: 10.1017/S0022112059000581.
23. Новиков Е.А. Изменчивость диссипации энергии в турбулентном потоке и распределение энергии по спектру // Прикладная математика и механика. 1963. Т. 27, № 5. С. 944–946.
24. Новиков Е.А., Стюарт Р.В. Переमेжаемость турбулентности и спектр флуктуаций диссипации энергии // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. Т. 3. С. 408–413.
25. Mahrt L. Intermittency of atmospheric turbulence // J. Atmos. Sci. 1989. V. 46, N 1. P. 79–95.
26. She Z.S., Jackson E., Orszag S.A. Intermittent vortex structures in homogeneous isotropic turbulence // Nature. 1990. V. 344, N 6263. P. 226–228. DOI: 10.1038/344226a0.
27. Hagelberg C.R., Gamage N.K.K. Structure-preserving wavelet decompositions of intermittent turbulence // Bound.-Lay. Meteorol. 1994. V. 70, N 3. P. 217–246. DOI: 10.1007/BF00709120.
28. Young G.S., Kristovich D.A., Hjelmfelt M.R., Foster R.C. Rolls, streets, waves, and more: A review of quasi-two-dimensional structures in the atmospheric boundary layer // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2002. V. 83, N 7. P. 997–1002.
29. Acevedo O.C., Moraes O.L., Degrazia G.A., Medeiros L.E. Intermittency and the exchange of scalars in the nocturnal surface layer // Bound.-Lay. Meteorol. 2006. V. 119, N 1. P. 41–55. DOI: 10.1007/s10546-005-9019-3.
30. Chowdhuri S., Prabhakaran T., Banerjee T. Persistence behavior of heat and momentum fluxes in convective surface layer turbulence // Phys. Fluids. 2020. V. 32, N 11. P. 115107. DOI: 10.1063/5.0027168.
31. Barthlott C., Drobinski P., Fesquet C., Dubos T., Pietras C. Long-term study of coherent structures in the atmospheric surface layer // Bound.-Lay. Meteorol. 2007. V. 125, N 1. P. 1–24. DOI: 10.1007/s10546-007-9190-9.
32. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. Т. 1: Структура потока. М.: Гостехиздат, 1954. 324 с.
33. Зоммерфельд А. Механика деформируемых сред. М.: ИИЛ, 1954. 491 с. Перевод изд.: Sommerfeld A. Mechanik der deformierbaren Medien. Wiesbaden, 1949.
34. Биркгоф Г. Гидродинамика. Методы. Факты. Подопбне. М.: ИИЛ, 1963. 244 с. Перевод изд.: Birkhoff G.

- Hydrodynamics. A study in logic, fact and similitude. Princeton, 1960.
35. *Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика. Ч. 2. М.: Физматгиз, 1963. 728 с.
  36. *Бетчов Р., Криминале В.* Вопросы гидродинамической устойчивости. М.: Мир, 1971. 350 с. Перевод изд.: *Betchov R., Criminale W.O.* Stability of Parallel Flows. New York, 1967.
  37. *Колчинский И.Г.* Оптическая нестабильность земной атмосферы по наблюдениям звезд. Киев: Наукова думка, 1967. 184 с.
  38. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
  39. *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.
  40. *Nosov V.V.* Atmospheric Turbulence in the Anisotropic Boundary Layer. In Optical waves and laser beams in the irregular atmosphere / N. Blaunshtein, N. Kopeika (eds.) London, New York, USA: Boca Raton, Taylor & Francis Group, CRC Press, 2018. Chap. 3, P. 67–180.
  41. *Lukin V.P., Nosov V.V., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Causes of non-Kolmogorov turbulence in the atmosphere // Appl. Opt. 2016. V. 55, N 12. P. B163–B168. DOI: 10.1364/AO.55.00B163.
  42. *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.
  43. *Lukin V.P., Bol'basova L.A., Nosov V.V.* Comparison of Kolmogorov's and coherent turbulence // Appl. Opt. 2014. V. 53, N 10. P. B231–B236. DOI: 10.1364/AO.53.00B231.
  44. *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.
  45. *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. DOI: 10.1117/12.2074614.
  46. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* The effect of intermittency of astronomical images in the high-altitude observations // Imag. Appl. Opt. 2019. OSA. 2019. DOI: 10.1364/COSI.2019.JW2A.36.
  47. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G.* Coherent structures in the turbulent atmosphere / A.B. Nadycto et al. (eds.) // Math. Models Non-lin. Phenomen., Process. Systems: From Molecular Scale to Planetary Atmosphere. New York: Nova Science Publishers, 2013. Chap. 20. P. 297–330.
  48. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* The Evolution of Turbulence Structure over Inhomogeneously Heated Surfaces. Nonlinearity: Problems, Solutions and Applications. V. 1 / L.A. Uvarova, A.B. Nadycto, A.V. Latyshev (eds.). New York: Nova Science Publishers, 2017. Chap. 17. P. 335–411.
  49. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G.* Coherent structures in turbulent atmosphere // Proc. SPIE. 2009. V. 7296-09. P. 53–70. DOI: 10.1117/12.823804.
  50. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Структура турбулентности над нагретыми поверхностями. Численные решения // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 1. С. 23–30; *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Turbulence structure over heated surfaces: Numerical solutions // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 3. P. 234–243. DOI: 10.15372/AOO20160103.
  51. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Kolmogorov's and coherent turbulence in the atmosphere // Imag. Appl. Opt. 2019. DOI: 10.1364/PCAOPT.2019.PM3C.3.
  52. *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; *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Afanas'ev V.L., Balega Yu.U., Vlasjuk V.V., Panchuk V.E., Yakopov G.V.* Astroclimate studies in the special astrophysical observatory of the Russian Academy of Sciences // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 1. P. 8–18. DOI: 10.15372/AOO20180804.
  53. *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Representation of the synoptic spectra of atmospheric turbulence by sums of spectra of coherent structures // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 2019. V. 231, N 012040. P. 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/231/1/012040.
  54. *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.
  55. *Колмогоров А.Н.* Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Докл. АН СССР. 1941. Т. 30, № 4. С. 299–303.
  56. *Колмогоров А.Н.* К вырождению изотропной турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости // Докл. АН СССР. 1941. Т. 31, № 6. С. 538–541.
  57. *Колмогоров А.Н.* Рассеяние энергии при локально изотропной турбулентности // Докл. АН СССР. 1941. Т. 32, № 1. С. 19–21.
  58. *Колмогоров А.Н.* Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1942. Т. 6, № 1–2. С. 56–58.
  59. *Колмогоров А.Н.* Уточнение представлений о локальной структуре турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при больших числах Рейнольдса // Mécanique de la turbulence: Colloq. Intern. CNRS, Marseille, aout sept. 1961 / На рус. и фр. яз. Paris, 1962. P. 447–458.
  60. *Prandtl L.* Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz // ZAMM – J. Appl. Math. Mech. / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1925. Bd. 5. N 2. P. 136–139. DOI: 10.1002/zamm.19250050212.
  61. *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. DOI: 10.1098/rspl.1883.0018.
  62. *Reynolds O.* On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion // Proc. Roy. Soc. 1894. V. 56. P. 40–45. DOI: 10.1098/rspl.1894.0075.
  63. *Liepmann H.W.* Aspects of the turbulence problem. Part 1 // J. Appl. Math. Phys. (ZAMP). 1952. V. 3, iss. 5. P. 321–342. DOI: 10.1007/BF02008148.



64. *Batchelor G.K.* The Theory of Homogeneous Turbulence. New York: Cambridge University Press, 1953. 197 p.
65. *Townsend A.A.* The structure of Turbulent Shear Flow. Cambridge: Cambridge University Press, 1956. 315 p.
66. *Bradshaw P.* The turbulence structure of equilibrium boundary layers // *J. Fluid Mech.* 1967. V. 29. P. 625–645. DOI: 10.1017/S0022112067001089
67. *Kaplan R.E., Laufer J.* The intermittently turbulent region of the boundary layer // *Appl. Mech. Proc.* 12th Internat. Congr. of Appl. Mech., 1968. Berlin, Heidelberg: Springer, 1969. P. 236–245. DOI: 10.1007/978-3-642-85640-2\_17.
68. *Liepmann H.W.* Experimental fluid mechanics: The impact of modern instrumentation // *Proc. 13 Internat. Congr. Theor. Appl. Mech. Moscow Univ.* Aug. 21–26, 1972. Berlin, Heidelberg: Springer, 1973. P. 200–212. DOI: 10.1007/978-3-642-65590-6\_13
69. *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. DOI: 10.1017/S002211207400190X.
70. *Davies P., Yule A.* Coherent structures in turbulence // *J. Fluid Mech.* 1975. V. 69, iss. 3. P. 513–537. DOI: 10.1017/S0022112075001541
71. *Frost W., Moulden T.H.* (eds.) Handbook of Turbulence. Vol. 1: Fundamentals and Applications. New York: Plenum Press. 1977. 498 p. DOI: 10.1007/978-1-4684-2322-8
72. *Кантуэлл Б.Дж.* Организованные движения в турбулентных потоках // Вихри и волны. Сб. статей. М.: Мир, 1984. С. 9–79. DOI: 10.1146/annurev.fl.13.010181.002325.
73. *Feigenbaum M.J.* Quantitative universality for a class of nonlinear transformations // *J. Stat. Phys.* 1978. V. 19. P. 25–52. DOI: 10.1007/BF01020332.
74. *Michalke A., Fuchs H.* On turbulence and noise of an axisymmetric shear flow // *J. Fluid Mech.* 1975. V. 70. P. 179–205. DOI: 10.1017/S0022112075001966.
75. *Adrian R.J.* On the role of conditional averages in turbulence theory // *Conf. Proc. 4th Biennial Symp. on Turbulence in Liquids.* University of Missouri-Rolla, 22–24 Sept. 1975. Princeton: Science Press, 1977. P. 323–332.
76. *Hussain A.K.M.F.* Coherent structures and studies of perturbed and unperturbed jets // *The Role of Coherent Structures in Modelling Turbulence and Mixing.* Lect. Not. in Phys. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981. V. 136. P. 252–291. DOI: 10.1007/3-540-10289-2\_30.
77. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. 6-е изд. М.: Наука, 1987. 840 с.
78. *Седунов Ю.С., Авдюшин С.И., Борисенков Е.П., Волковицкий О.А., Петров Н.Н., Рейтенбах Р.Г., Смирнов В.И., Черников А.А.* (ред.). Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеониздат, 1991. 510 с.
79. *Vernet A., Kopp G.A., Ferré J.A., Giralt F.* Three-dimensional structure and momentum transfer in a turbulent cylinder wake // *J. Fluid Mech.* 1999. V. 394. P. 303–337. DOI: 10.1017/S0022112099005807.
80. *Ryu J., Cheong C., Kim S., Lee S.* Computation of internal aerodynamic noise from a quick-opening throttle valve using frequency-domain acoustic analogy // *Appl. Acoustics.* 2005. V. 66, N 11. DOI: 10.1016/j.apacoust.2005.04.002.
81. *Millet C., Robinet J.C., Roblin C.* On using computational aeroacoustics for long range propagation of infrasounds in realistic atmospheres // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34, N 14. DOI: 10.1029/2007GL029449.
82. *Боровик А.В., Коняев П.А.* Астроклимат Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН // *Изв. Иркутского гос. уни-та. Сер. Науки о Земле.* 2014. Т. 8. С. 25–34.
83. *Волков М.В., Гаранин С.Г., Козлова Т.И., Конавальцов М.И., Копалкин А.В., Лебедев Р.С., Старииков Ф.А., Течко О.Л., Тютин С.В., Хохлов С.В., Цыкин В.С.* Фазировка излучения 7-канального оптоволоконного лазера с динамическими турбулентными искажениями фазы с использованием стохастического параллельного градиентного алгоритма при ширине полосы 450 кГц // *Квант. электрон.* 2020. Т. 50, № 7. С. 694–699. DOI: 10.1070/QEL17193.
84. *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.
85. *Мионов В.Л., Носов В.В.* О влиянии внешнего масштаба атмосферной турбулентности на пространственную корреляцию случайных смещений световых пучков // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1974. Т. 17, № 2. С. 274–281. DOI: 10.1007/BF01037408.
86. *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.
87. *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. DOI: 10.1117/12.2231941.
88. *Корн Г.А., Корн Т.М.* Справочник по математике для ученых и инженеров. М.: Наука, 1973. 834 с.
89. *Монин А.С.* Об определении когерентных структур // *Докл. АН СССР.* 1991. Т. 318, № 4. С. 853–856.
90. *Монин А.С.* О когерентных структурах в турбулентных течениях // *Этюды о турбулентности.* М.: Наука, 1994. С. 7–17.
91. *Norf E.* A mathematical example displaying features of turbulence // *Commun. Pure Appl. Math.* 1948. V. 1, N 4. P. 303–322. DOI: 10.1002/CRA.3160010401.
92. *Жуковский Н.Е.* О снежных заносах и заилении рек. 1919. С. 451–474 // Полное собрание сочинений. Т. 3. Гидродинамика. М., Л.: ОНТИ, 1936. 487 с.
93. *Прандтль Л., Титвенс О.* Гидро- и аэромеханика. Т. 1. М.: ГИТТЛ, 1933. 224 с.
94. *Монин А.С.* Структура атмосферной турбулентности // *Теория вероятностей и ее применения* 1958. Т. 3, вып. 3. С. 285–317.
95. *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.
96. *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.
97. *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.
98. *Brandt P.N., Mauter H.A., Smartt R.* Day-time seeing statistics at Sacramento Peak Observatory // *Astron. Astrophys.* 1987. V. 188, N 1. P. 163–168.

99. 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.
100. Brandt P.N. Frequency spectra of solar image motion // Solar Phys. 1969. V. 7. P. 187–203. DOI: 10.1007/BF00224897.
101. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Bogushevich A.Ya. Measurement of atmospheric turbulence characteristics by the ultrasonic anemometers and the calibration processes // Atmosphere. 2019. V. 10, N 8. P. 1–15. DOI: 10.3390/atmos10080460.
102. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Лукин В.П., Носов В.В., Носов Е.В., Торгаев А.В. Аппаратно-программный комплекс для исследований структуры полей турбулентных флуктуаций температуры и ветра // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 5. С. 378–384; Azbukin A.A., Bogushevich A.Ya., Lukin V.P., Nosov V.V., Nosov E.V., Torgaev A.V. Hardware-software complex for studying the structure of the fields of temperature and turbulent wind fluctuations // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 5. P. 479–485. DOI: 10.15372/AOO20180507.
103. Азбукин А.А., Богушевич 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.
104. Liepmann H.W. Aspects of the turbulence problem. Part 2 // J. Appl. Math. Phys. (ZAMP) V. 3, iss. 6. P. 407–426. DOI: 10.1007/BF02025569.
105. Townsend A.A. The Structure of Turbulent Shear Flow. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1976. 429 p. DOI: 10.1002/zamm.19760560921.

V.V. Nosov, V.P. Lukin, P.G. Kovadlo, E.V. Nosov, A.V. Torgaev. **Intermittency of Kolmogorov and coherent turbulence in the mountain boundary layer (overview).**

This overview is devoted to the intermittency of atmospheric turbulence of different types (of Kolmogorov and coherent) in the mountain boundary layer. A brief overview of the world scientific literature on the types of turbulence intermittency is made for a better understanding of the place of intermittency of different types among them. Due to available in literature various interpretations of the coherent turbulence concept, our earlier overviews of the world scientific literature on coherent turbulence and coherent structures are supplemented; these overviews describe the mechanisms of the origination (formation) of coherent turbulence and the key properties of coherent turbulence, as well as indicate the differences and relationships between the Kolmogorov and coherent turbulence. Discussion of the contemporary scientific understanding of turbulence structure can be attributed to the overviews results. Thus, the authors previously (2008–2019) independently showed that atmospheric turbulence can be considered as an incoherent mixture of various coherent structures. At the same time, there is a conjecture by E. Hopf (1948) about the finite dimensionality of attractors in the phase space of solutions of the Navier–Stokes equations. Physical interpretation of this conjecture, as pointed out by A.S. Monin and A.M. Yaglom (1991, 1992), is the representation of turbulence structure as a spatio-temporal chaos of a finite number of interacting coherent structures. From comparison of these representations, it can be seen that the authors' results are in fact a proof of E. Hopf's conjecture in interpretation, formulated by A.S. Monin and A.M. Yaglom, and that the "chaos" of a turbulence is to a large extent determinate.

The overview results of the study of the turbulence intermittency of different types are the consequent of many years experimental studies of turbulence by acoustic and optical methods performed by the authors at mountain astronomical observatories. Lifetimes of the turbulence different types: Kolmogorov and coherent, recorded in optical and meteorological measurements are given. It is shown that the effect of the intermittency of turbulence types characterizes the turbulence local structure over the observatory location region and allows to develop practical recommendations for the most favorable observation regime at astronomical observatories.