



Микроструктура турбулентности в нижнем слое атмосферы

П.Г. Ковадло, А. Ю. Шиховцев

Институт солнечно-земной физики СО РАН

kovadlo2006@rambler.ru, artempochta2009@rambler.ru

г. Иркутск,

**V Всероссийская конференция с международным участием
«Турбулентность, динамика атмосферы и климата», посвященная памяти
академика Александра Михайловича Обухова 19–21 ноября 2024 г.**

Москва

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10043,

<https://rscf.ru/project/24-72-10043/>». г. Иркутск

Об актуальности исследования атмосферной турбулентности на разных высотах

- Изучение атмосферной турбулентности и ее оптических свойств важно:
- для астрооптических исследований в процессах планирования и поиска новых пунктов (астроплощадок) установки телескопов наземного базирования,
- для повышения информативности оптических линий связи
- поиска новых методов и средств коррекции атмосферных искажений изображений в астрономических инструментах
- понимания физических механизмов генерации и эволюции турбулентности в разных слоях атмосферы.

Проблема оценки распределения показателя преломления в атмосфере по лучу зрения остается актуальной для астроклиматических задач и техники коррекции изображений в адаптивных оптических системах

- Для расчета (прогноза) астроклиматических характеристик качества и коррекции изображений в фокусе телескопа требуются знания по распределению с высотой вариаций показателя преломления, обусловленных мелкомасштабной структурой турбулентности в пространстве десятков метров.*
- Энергию пульсаций в заданном диапазоне (высокочастотном) больших волновых чисел оценивают на основе расчетной мощности пульсаций и осредненной формы спектров пульсаций скорости и температуры воздуха, по наблюдательным данным в широком диапазоне.*
- Известные современные расчетные модели распределения оптической турбулентности с высотой (все без исключения) с большими погрешностями прогнозируют изменения показателя преломления в пограничном слое атмосферы.*

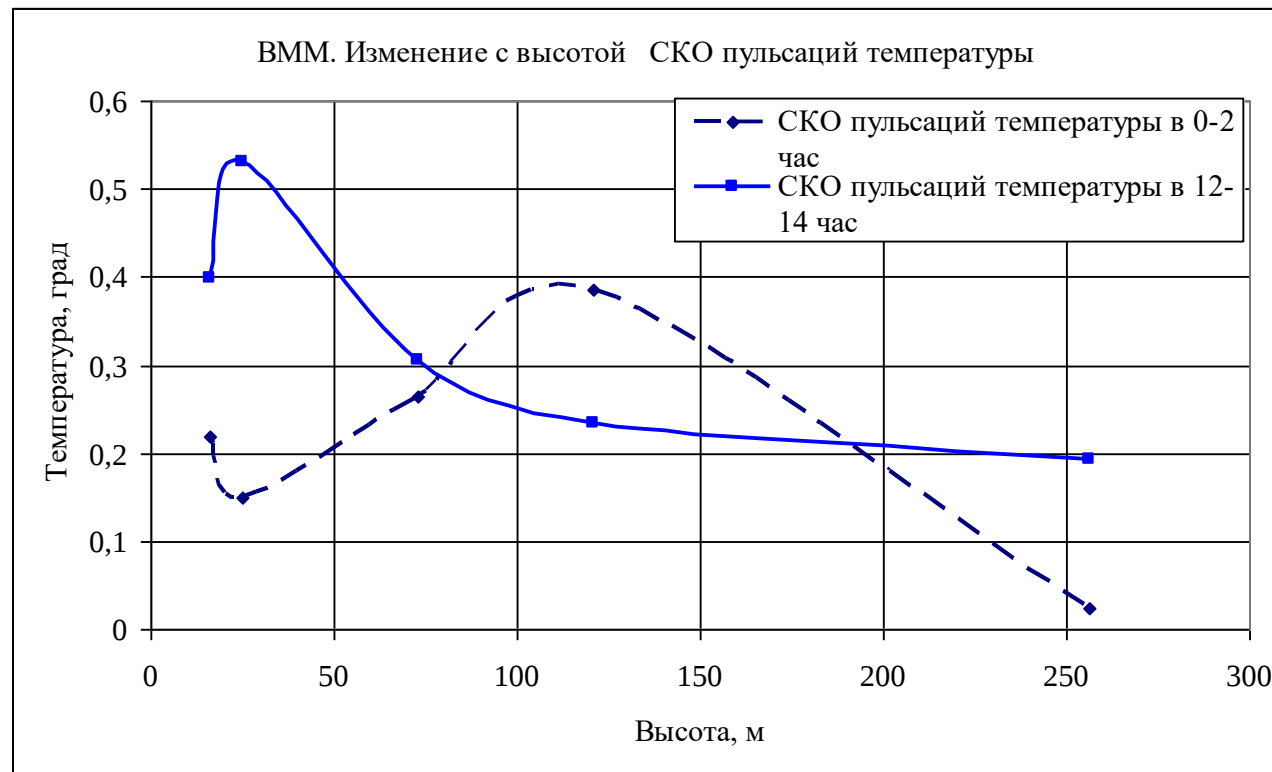
Цель исследования

- Настоящая работа направлена на исследования микроструктуры несущего потока воздуха, структурированного пульсациями скорости ветра на разных высотах над подстилающей поверхностью в пределах пограничного слоя атмосферы.
- *Наибольший интерес для расчетных атмосферных томографических схем представляет генерация температурных пульсаций на разных высотах в микролинейных масштабах*

Исследование выполнено по данным микрометеорологических наблюдений в пограничном слое атмосферы до высоты 301 м и приземном слое до 30 м **при ясном небе (при общей облачности меньше 2 баллов)**

- Для макро, мезо и микро масштабных исследований были выбраны данные измерений скорости горизонтальной и вертикальной составляющих ветра и температуры воздуха для центральных месяцев сезонов года.
- В исследовании использован архив микрометеорологических данных, полученных на Высотной метеорологической мачте ВММ – 310 ФГБУ "НПО «Тайфун». Наблюдения были выполнены на разных уровнях до высоты 301 м малоинерционными акустическими датчиками с шагом 0,2 с с последующим временным осреднением до 10 мин.
- Архив микрометеорологических данных, полученных на астроплощадке Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО с помощью метеостанций МЕТЕО с акустическими малоинерционными датчиками температуры и ветра с шагом 0,1 с по многосуточным интервалам времени на высотах до 30 м.

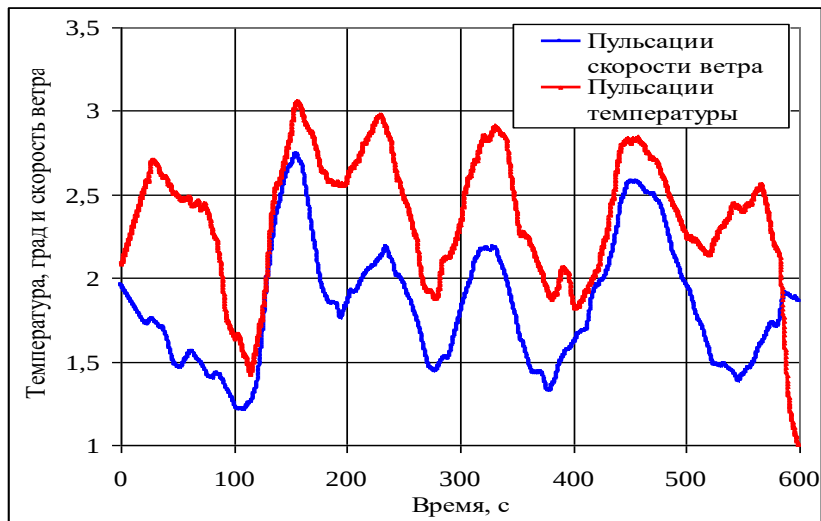
Изменение с высотой средних квадратических значений температуры воздуха при общей облачности менее 2 баллов в дневное (12-14 час) и ночное (0-2 час) время суток (число $R_i \sim 0,2$ ночь и $-0,4$ день)



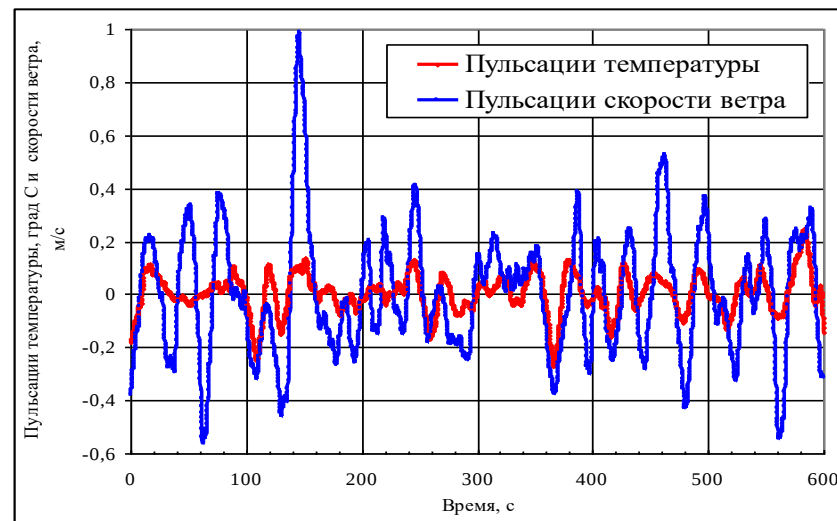
Фрагмент изменений температуры под действием пульсаций (порывов) скорости ветра на высоте 16 м при устойчивой стратификации

- в диапазоне 20 – 600 с температурные изменения структурируются порывами скорости ветра с коэффициентом корреляции больше 0,61.
- Синхронизация процесса структуризации нарушается с уменьшением масштабов температурных неоднородностей и неоднородностей скорости ветра.

а)



б)



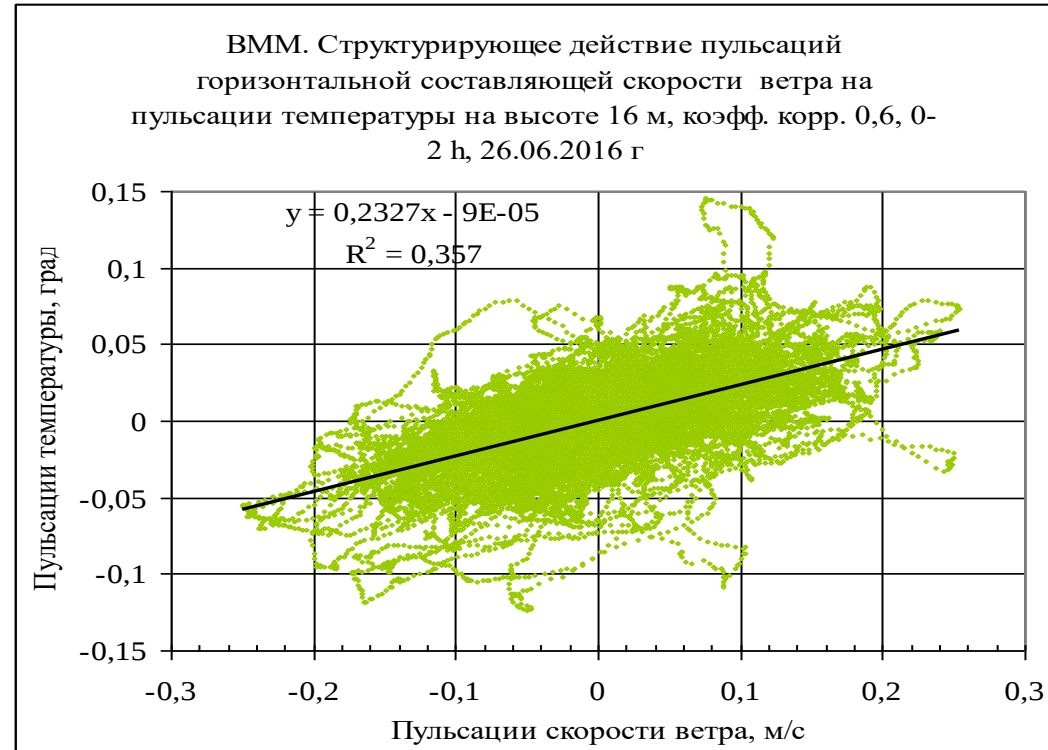
Фрагмент изменений температуры и горизонтальной составляющей скорости ветра на высоте 16 м над подстилающей поверхностью показывает:

- Синхронизация процесса структуризации нарушается с уменьшением масштабов температурных неоднородностей и неоднородностей скорости ветра.
- Из сравнения изменения пульсаций температуры и скорости ветра, показанных на рис. а) и б), следует, что структурирующее действие пульсаций скорости ветра на пульсации температуры снижается
- - при осреднении от 20 секунд до 5 секунд : коэффициенты корреляции изменяются от 0,61, до 0,2
- - при 0,5-секундном и меньшем осреднении корреляция проявляется только в кратковременно

Структурирующее действие пульсаций горизонтальной составляющей скорости ветра на формирование пульсаций температуры на высоте 16 м

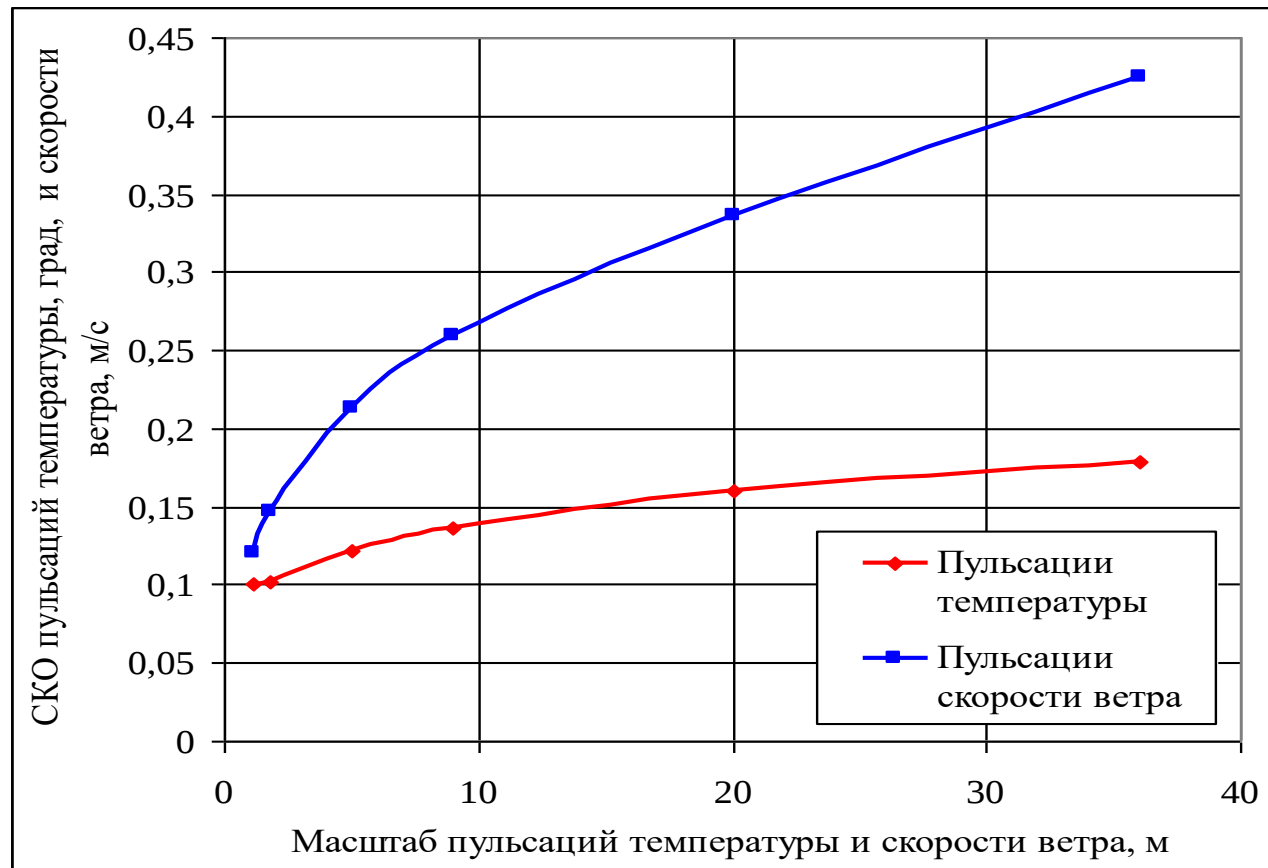
- Процесс генерации пульсаций температуры под воздействием пульсаций горизонтальной составляющей скорости ветра на высоте 16 м.*

Время наблюдений 4 с,
коэффициент взаимной
корреляции 0,6. Число
Ричардсона $Ri = -0,3$



Распределение СКО пульсаций температуры и горизонтальной составляющей скорости ветра по масштабам на высоте 16 м, при ясном небе при устойчивости – число Ричарсона $\sim 0,2$, средняя скорость ветра $\sim 1,8$ м/с

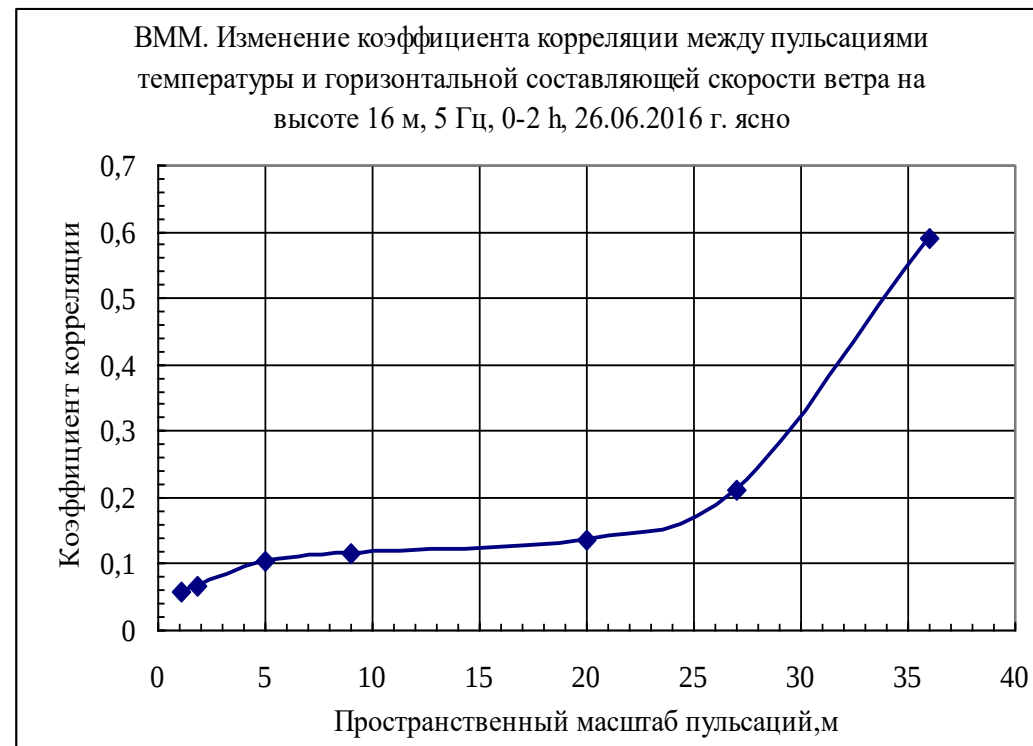
При термической устойчивости на высоте 16 м и средней скорости 1,8 м/с взаимный коэффициент корреляции СКО пульсаций температуры и горизонтальной составляющей скорости ветра достигает 0,95 на линейных масштабах от 1 до 36 м



Структуризация турбулентных пульсаций температуры в потоке воздуха на высоте 16 м над подстилающей поверхностью в ночное время (0-2 h, 26.06.2016 г) $Ri \sim 0,2$

Изменение коэффициента взаимной корреляции пульсаций температуры и скорости ветра

1. Структурирующее действие ветровых пульсаций на температурные теряется в диапазоне от 36 м до 25 м при устойчивой стратификации при $Ri \sim 0,2$ и ясном небе на высоте 16 м
2. Рост взаимного коэффициента корреляции пульсаций ветра и температуры происходит с увеличением линейных размеров начиная с 25 м. **Этот масштаб (от 0,6 м до 25 м) неоднородностей можно назвать внешним,**
3. Внутренняя структура геофизической турбулентности в диапазоне меньшем 25 м приобретает случайный характер.



Связь между пульсациями температуры и горизонтальной составляющей скорости ветра на высотах 16 м и 121 м в диапазоне оптической турбулентности



В нижней части пограничного слоя атмосферы рост взаимного коэффициента корреляции пульсаций ветра и температуры происходит с увеличением линейных размеров начиная с 25 м. Этот масштаб неоднородностей можно назвать внешним, когда внутренняя структура геофизической турбулентности в диапазоне меньшем 25 м приобретает случайный характер.

В верхней части пограничного слоя рост коэффициента корреляции начинается с масштабов более 5 м, следовательно, с высотой внешний масштаб в пограничном слое при устойчивой стратификации уменьшается

Комментарий к рисунку - Изменение коэффициента взаимной корреляции пульсаций температуры и скорости ветра

- Границу роста значения взаимного коэффициента корреляции от 0,6 м до 25 м неоднородностей пульсаций ветра и температуры можно назвать **внешним масштабом**.
- Внутренняя структура геофизической турбулентности в диапазоне меньше 25 м приобретает случайный характер.
- Коэффициенты корреляции пульсаций T и V с уменьшением линейных размеров также уменьшаются (в приведенном примере с 0,6 - для пульсаций масштабом 36 м до 0,4 - для масштабов 1,8 м и до 0,05 - масштабов меньше 1 м).

Изменение с высотой средней температуры в пограничном слое воздуха - 1, СКО пульсаций температуры - 2, СКО пульсаций температуры в диапазоне колебаний 0,2 - 0,4 с за период 12-14 h - 3

Средний линейный размер пульсаций на высоте 16 м ~1,4 м, на высоте 256 м ~ 2,26 м

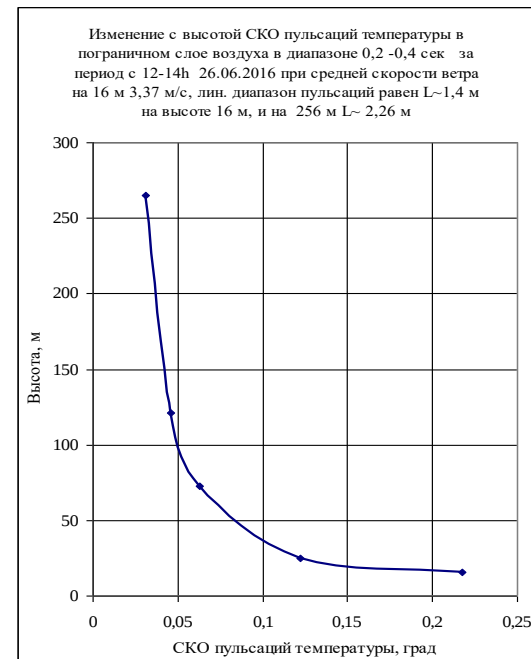
1



2

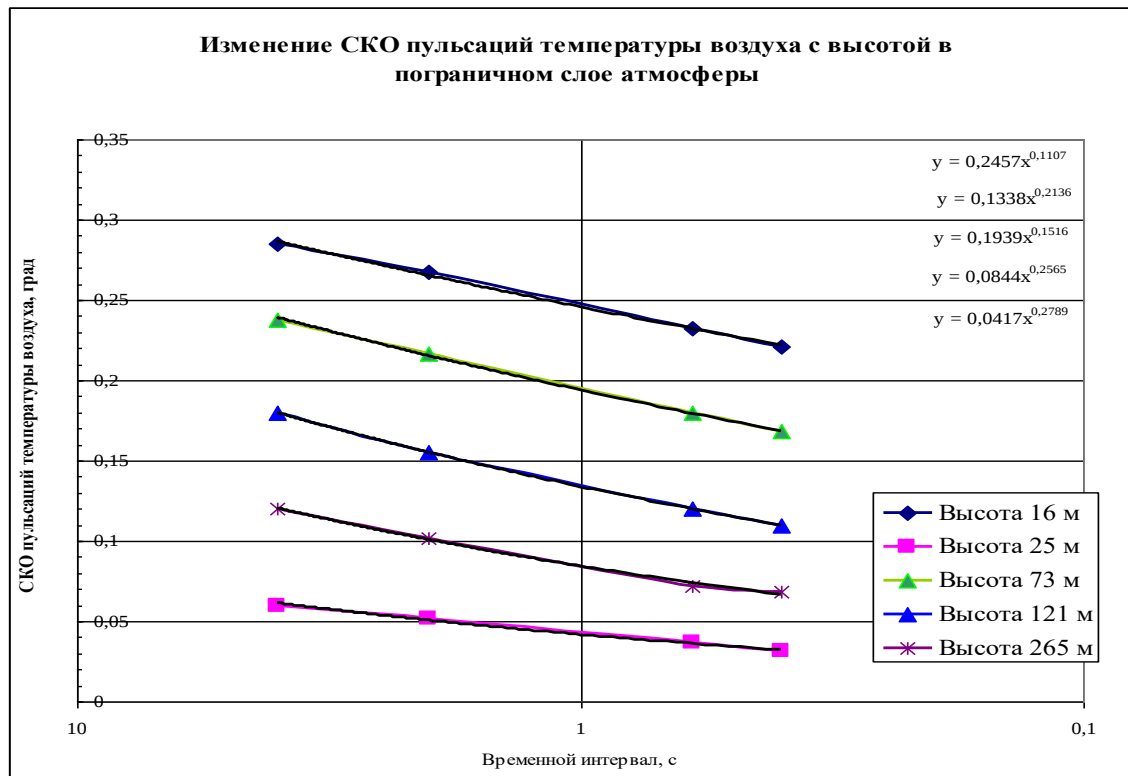


3



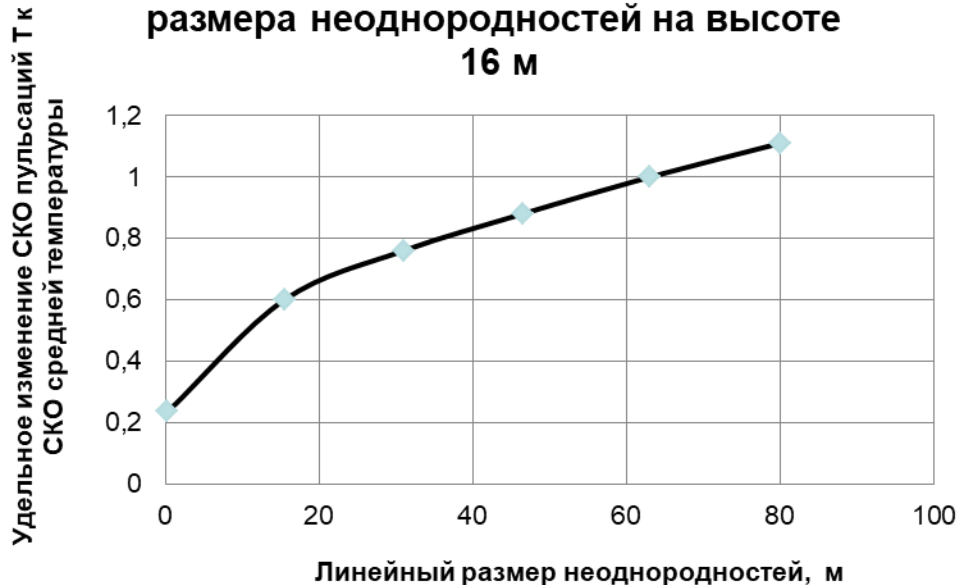
- Обращает на себя внимание гладкий профиль изменения с высотой СКО в диапазоне 0,2- 0,4 с - 3
- Аналогичный гладкий профиль имеет в этом диапазоне и C_n^2

Изменение энергии пульсаций температуры с высотой

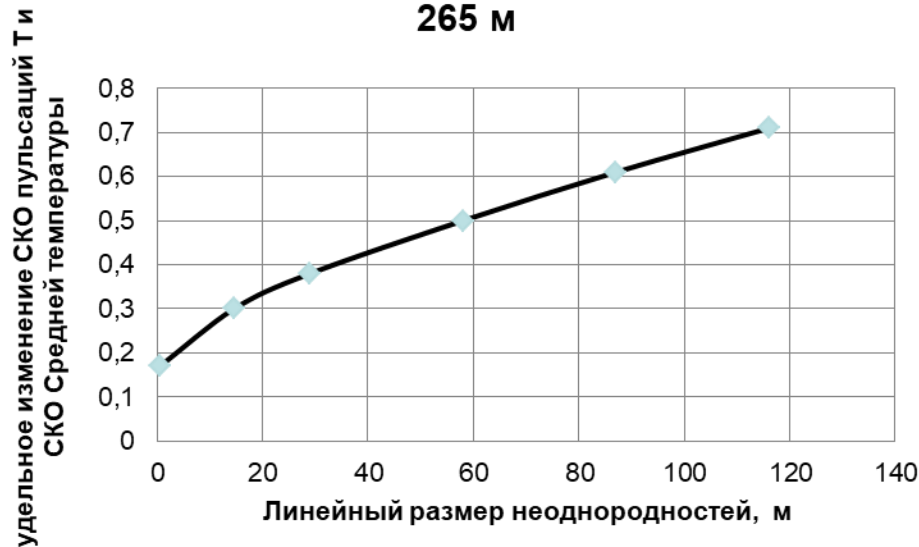


Зависимость удельных значений пульсаций температуры от линейного размера неоднородностей на высотах 16 м и 265 м

**Изменение удельных значений
пульсаций температуры от линейного
размера неоднородностей на высоте
16 м**



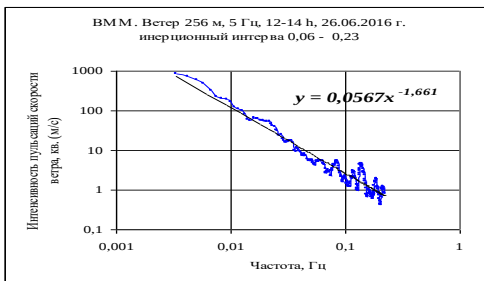
**Изменение удельных значений
пульсаций температуры от линейного
размера неоднородностей на высоте
265 м**



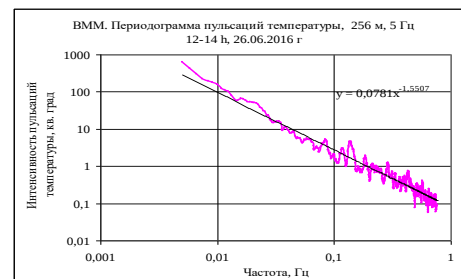
Форма спектров пульсаций температуры и горизонтальной составляющей скорости ветра на разных высотах над подстилающей поверхностью по синхронным данным, полученным на ВММ (г.Обнинск) при ясном небе.

- Особенностью формы спектров пульсаций температуры является их меньший наклон по сравнению с формой спектра пульсаций горизонтальной составляющей скорости ветра.
- Наблюдения выполнены синхронно*

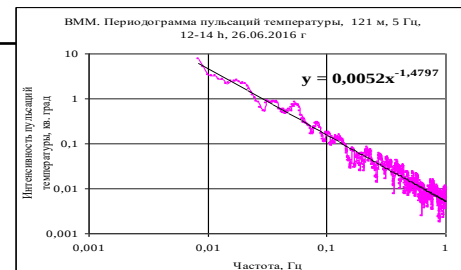
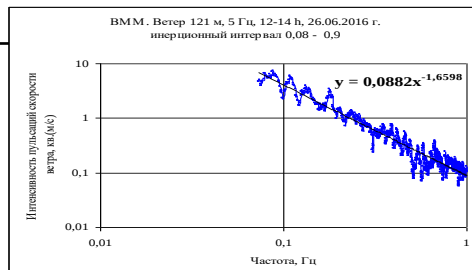
265 м



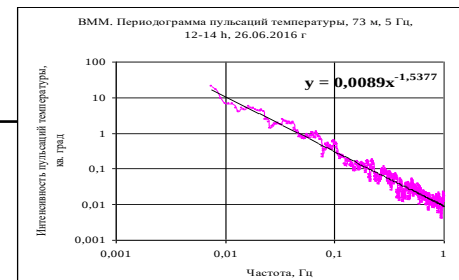
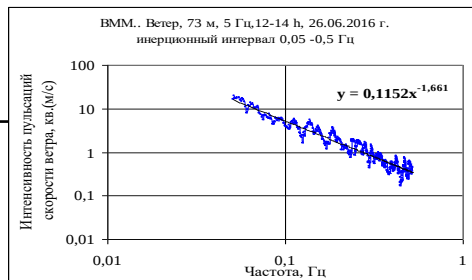
Т



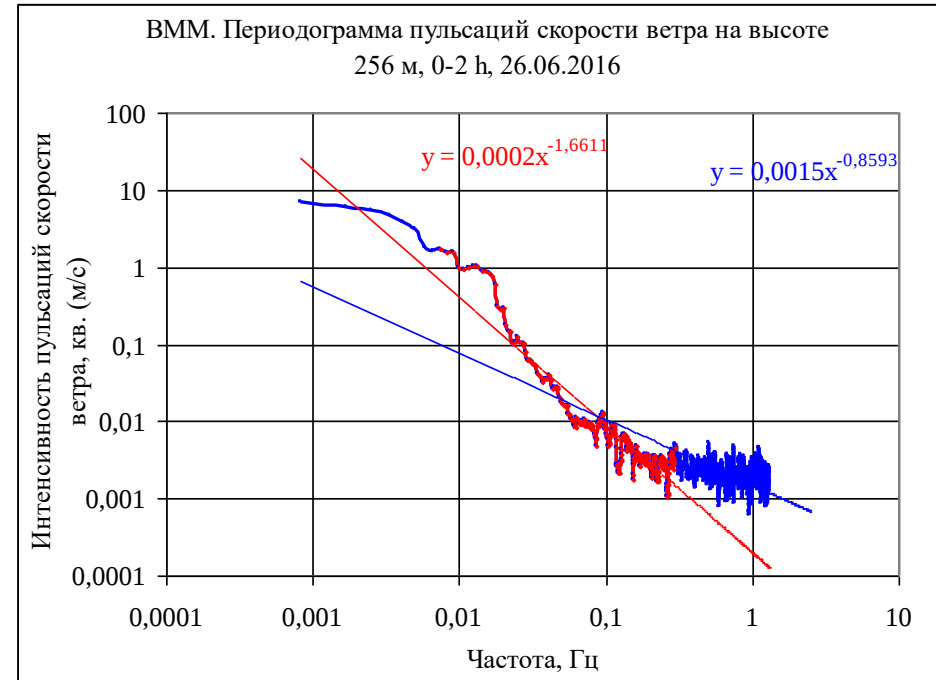
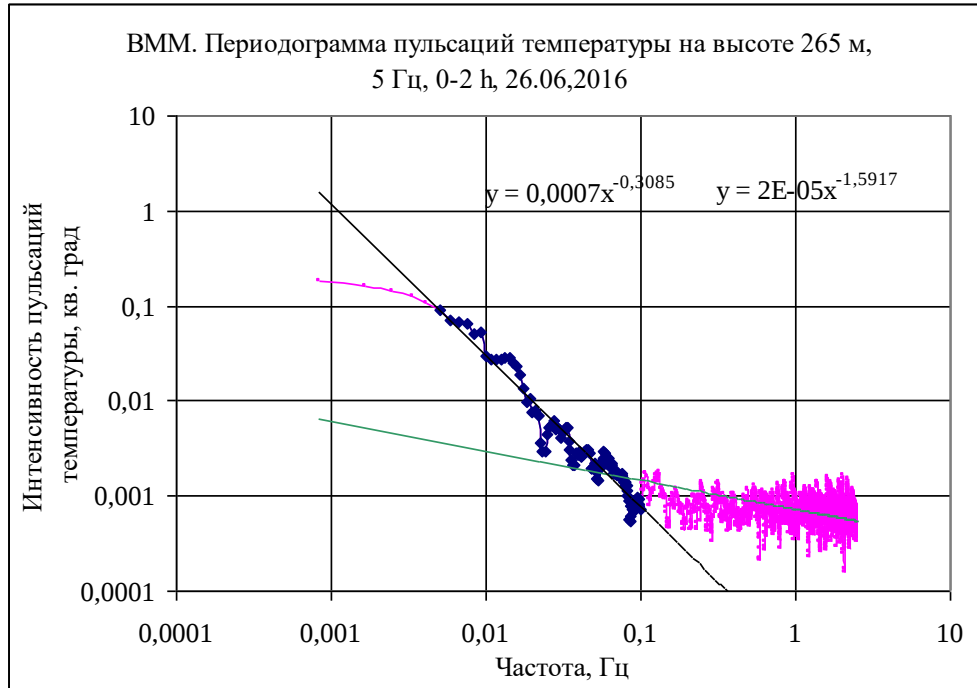
121 м



73 м

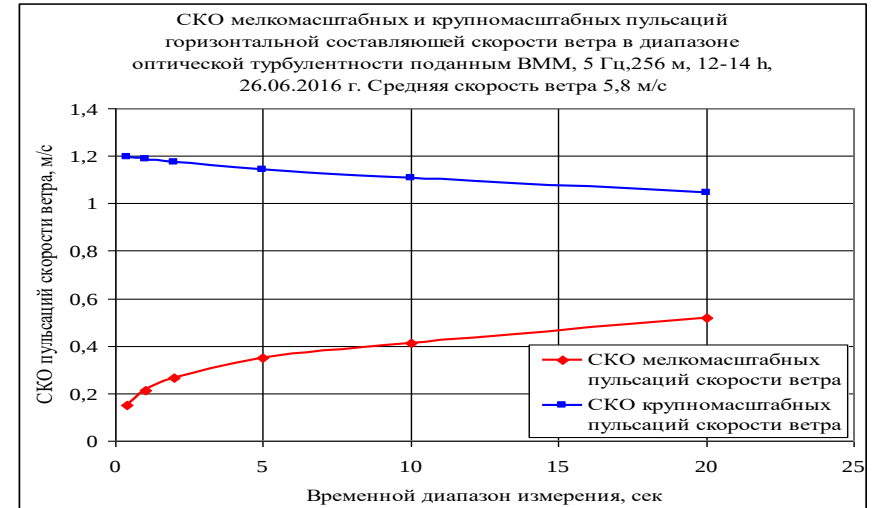


ВММ. Периодограмма пульсаций температуры в оптическом диапазоне турбулентности на высоте 256 м



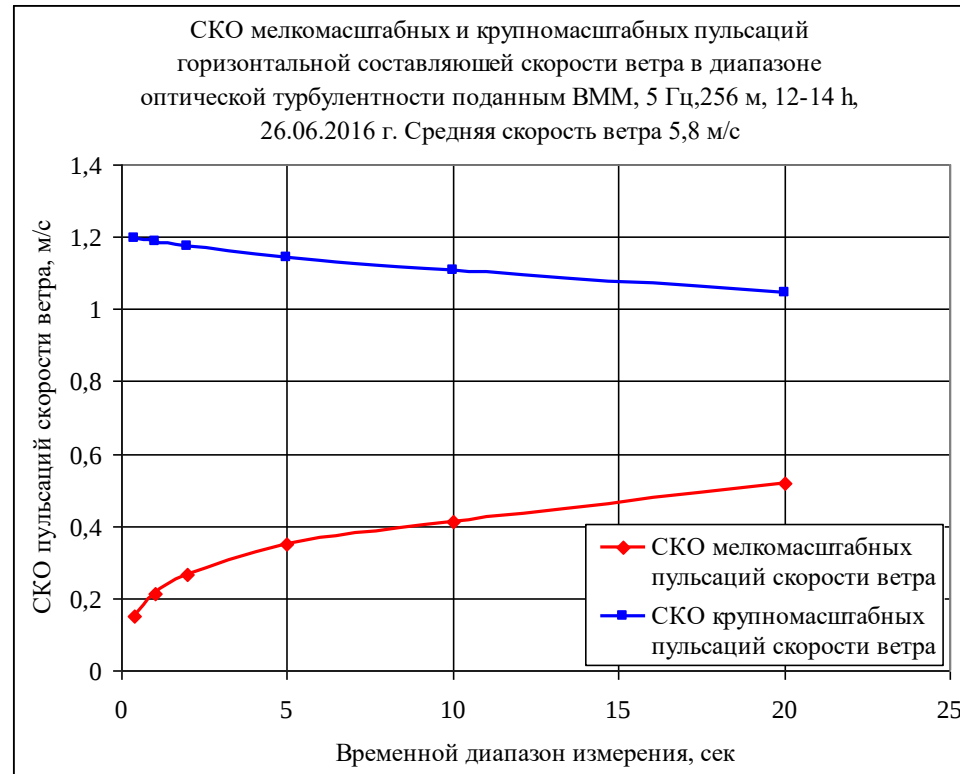
Внешний масштаб турбулентности ограничен верхней границей инерционного интервала в гидродинамическом представлении.
Внешний масштаб оптической турбулентности в видимом диапазоне длин волн связан с фильтрующим действием приемной апертуры и конкретно с ее линейными размерами

- Здесь представлено изменение с высотой соотношения СКО короткопериодных и длиннопериодных пульсаций температуры на высотах 16 и 121 м. Можно видеть, что насыщение СКО зависит от мощности турбулизации, которая с высотой уменьшается



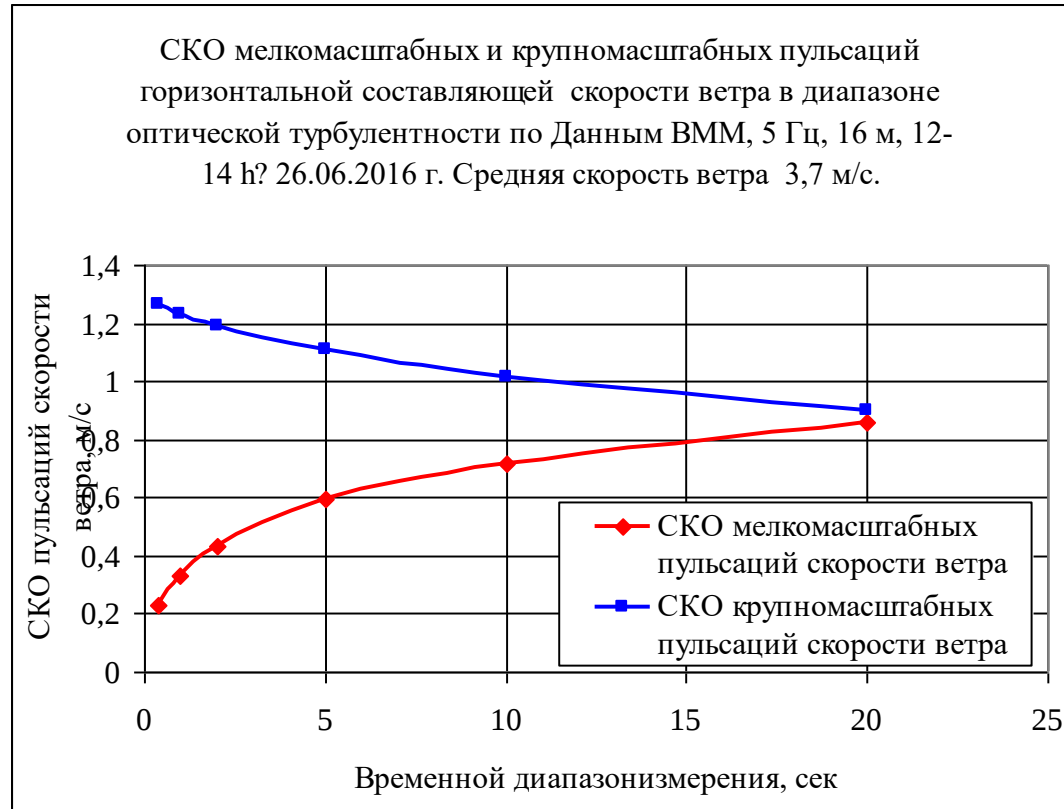
При выборе параметризаций для расчета вертикальных изменений характеристик мелкомасштабной структуры в диапазоне оптической турбулентности следует учитывать приведенный результат.

Соотношение СКО короткопериодных и длиннопериодных пульсаций температуры в диапазоне оптической турбулентности, высота 16 м, полдень, ясно

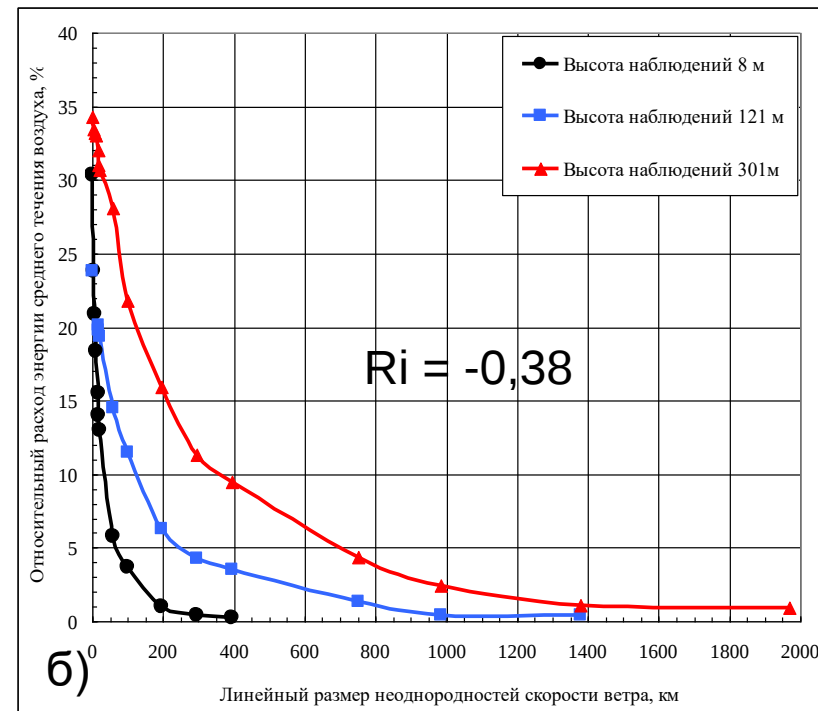
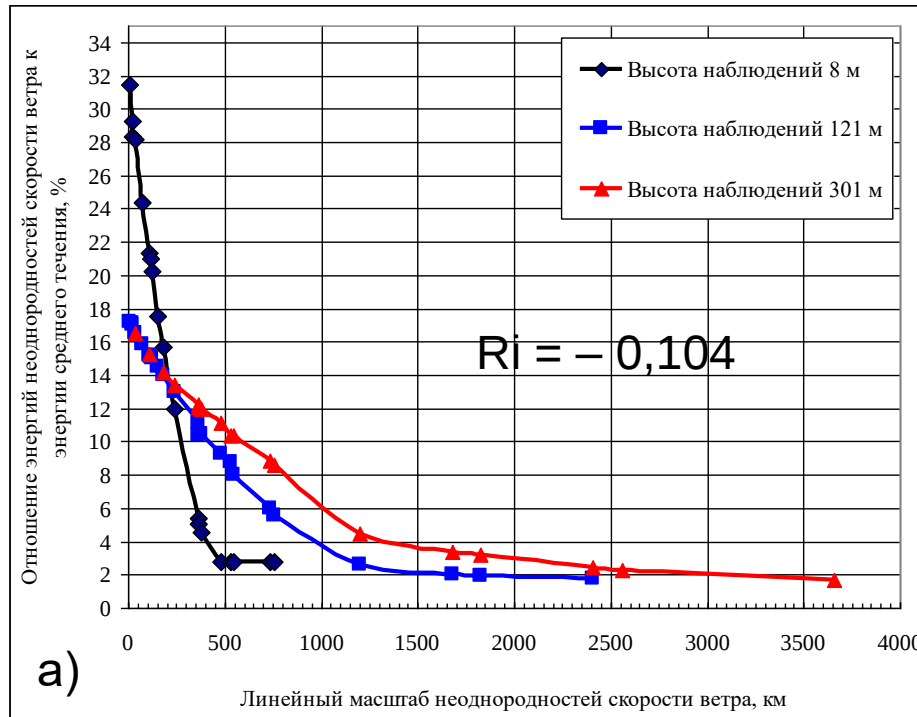


СКО мелкомасштабных и крупномасштабных пульсаций горизонтальной составляющей скорости ветра, высота 16 м, полдень, ясно

- Внешний масштаб турбулентности ограничен верхней границей инерционного интервала в гидродинамическом представлении
- Внешний масштаб оптической турбулентности в видимом диапазоне длин волн связан с фильтрующим действием приемной апертуры и конкретно с ее линейными размерами



Расход кинетической энергии осредненного несущего потока воздуха на генерацию пульсаций скорости ветра на высотах 8 м, 121 м и 301 м в январе - а) и июле - б) 2014 г

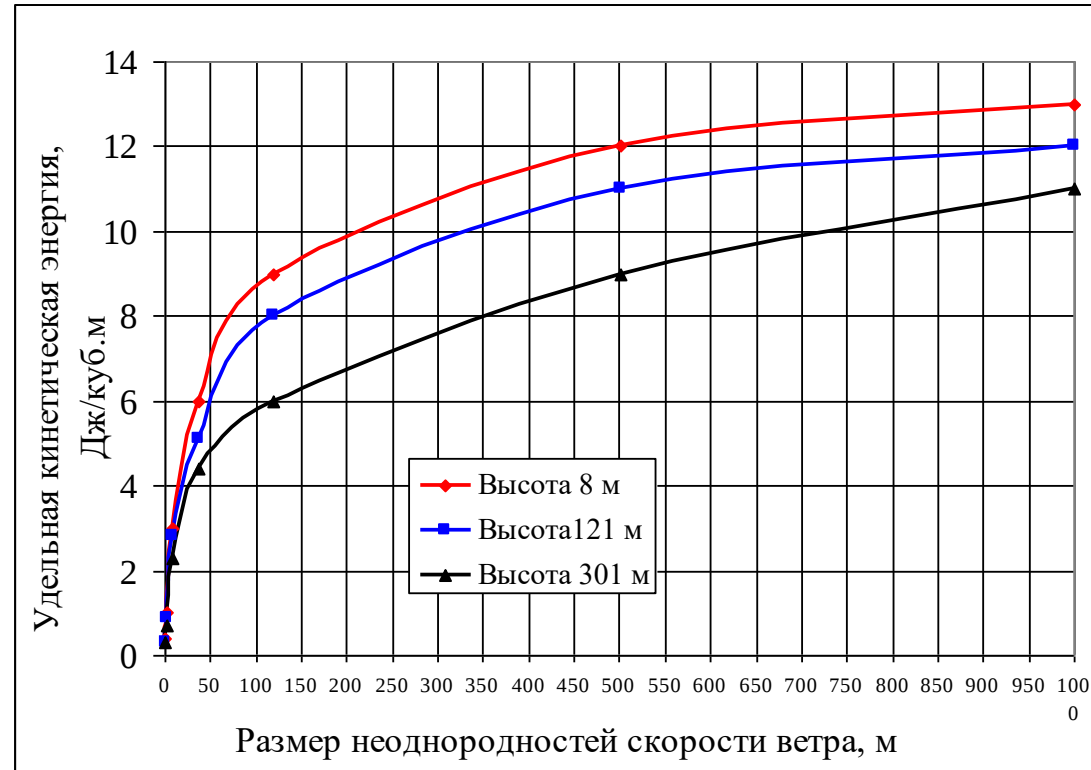


Удельная кинетическая энергия K' пульсаций скорости ветра для каждого масштаба оценивалась по соотношению $K' = \rho (\sigma_v)^2 / 2$, где ρ – плотность воздуха для средних значений температуры, σ_v среднее квадратическое отклонение пульсаций скорости ветра

Изменение удельной кинетической энергии пульсаций (неоднородностей) скорости ветра от линейного размера неоднородностей

Комментарий:

1. Удельная кинетической энергии интенсивно растет с увеличением линейного размера пульсаций до 100 м;
2. С высотой удельная кинетической энергии уменьшается для всех линейных размеров пульсаций;



Расходы несущего потока на генерацию пульсаций скорости ветра на разной высоте пограничного слоя атмосферы

- *На генерацию пульсаций скорости ветра размером ~ 6 км, при средней скорости несущего потока на этой высоте $1,84$ м/с, тратится до 32% удельной энергии несущего потока или $0,68$ Дж/м³.*
- *Отметим, что турбулентность развивается при термической неустойчивости нижнего слоя воздуха, среднее значение числа Ричардсона в этом слое составляет $-0,104$.*
- *С увеличением масштабов, расходы кинетической энергии на генерацию пульсаций скорости снижаются почти линейно до 3% на масштабах 450 км и ниже, т.е. тепловой эквивалент перехода кинетической энергии крупномасштабных пульсаций скорости в тепло уменьшается почти в 10 раз и составляет около $0,07$ Дж/м³ на высоте 8 м.*

•Результаты

- 1.Пульсации температуры структурированы полем неоднородностей (пульсаций) скорости ветра в широком диапазоне линейных масштабов.
- 2.Диапазон линейных размеров некоррелированной турбулентности в нижней части пограничного слоя атмосферы при устойчивой стратификации не превышает 20 – 30 м, с высотой размеры уменьшаются до 5 – 10 м.
3. Форма спектров пульсаций температуры в пограничном слое атмосферы отличается от формы спектров пульсаций скорости ветра более медленным спадом.

Рекомендации:

- 1.При моделировании вертикального профиля C_n^2 в параметризациях необходим учет корреляционных соотношений неоднородностей температуры и скорости ветра в диапазоне оптической турбулентности.
- 2.Для эффективной работы узкопольных и широкопольных адаптивных систем коррекции оптические элементы должны быть согласованы с «внешними» особенностями оптической турбулентности.

В заключении можно сказать:

- а - представленный в работе способ анализа затрат энергии несущего потока воздуха на генерацию пульсаций дает возможность адекватно оценивать развитость турбулентности в пограничном слое атмосферы по осредненным сетевым метеорологическим данным;
- б - полученная оценка изменения мощности спектра пульсаций скорости ветра с высотой в пограничном слое атмосферы позволяет рассчитывать термодинамические динамические характеристики пульсаций по осредненным данным наблюдений;
- г – определять региональные астроклиматические особенности и перспективность выбранных пунктов для телескопических наблюдений;
- Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 24-72-10043, <https://rscf.ru/project/24-72-10043/>»).



Спасибо за внимание

ЛЕТО ДЕЛАЕМ МЫ — МУХИ!

Периодограмма пульсаций температуры в оптическом диапазоне турбулентности высота 25 м, астроплощадка Байкальской астрофизической обсерватории

