

ОПТИКА СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

УДК 551.51, 551.55

Приземная турбулентность в Саянской солнечной обсерватории летом 2023 г.

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

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

Поступила в редакцию 27.09.2023;
после доработки 30.01.2024;
принята к печати 02.02.2024

Для оценки влияния атмосферной турбулентности на качество получаемых астрономических изображений требуются соответствующие исследования на территориях обсерваторий. Приведены результаты измерений характеристик турбулентности в Саянской солнечной обсерватории (ССО) летом 2023 г. Установлено, что причиной появления преобладающего направления возникающих на территории ССО местных ветров является температурный горно-долинный градиент между горами Саяны севернее обсерватории ССО и долиной южнее. Показано, что в ССО сохраняется меньший уровень средней интенсивности атмосферной турбулентности по сравнению с турбулентностью над ровной местностью в средних широтах. Подтверждено наличие на территории ССО когерентной турбулентности, в условиях которой улучшается качество получаемых оптическими приборами изображений. Получены новые данные для используемых в теории подобия Монина—Обухова турбулентных масштабов температуры и скорости ветра в зависимости от стратификации атмосферы. Результаты будут полезны специалистам по астроклимату и теории атмосферной турбулентности.

Ключевые слова: турбулентность, астроклимат, стратификация, турбулентный масштаб, когерентность турбулентности, качество изображений; turbulence, astroclimate, stratification, turbulent scale, turbulence coherence, image quality.

Введение

Качество астрономических изображений в значительной степени определяется [1–6] совокупностью атмосферных ситуаций (астроклиматом). Важнейшие составляющие астроклимата: прозрачность воздуха, фоновое свечение, суточные перепады температуры, сила ветра, направление ветра, однородность воздуха, характеризующая степень размытия оптического изображения из-за действия атмосферной турбулентности. Так как атмосферная турбулентность проявляется в случайных отклонениях характеристик воздуха от средних значений, то ее исследование включает в себя и изучение этих средних значений. Поэтому в условиях, когда обычно проводятся астрономические наблюдения (безоблачная и незамутненная атмосфера без фоновой засветки), атмосферная турбулентность становится главной составляющей астроклимата.

Высотная структура (высотные профили) турбулентности в значительной мере определяется характеристиками турбулентности в нижнем призем-

ном слое атмосферы [7], поэтому исследование этих характеристик необходимо в прогнозах как высотной структуры турбулентности, так и в целом качества астрономических изображений.

Настоящая работа является продолжением предыдущих исследований авторов, направленных на долговременное изучение и прогноз астроклиматических условий, реализующихся на территориях астрономических обсерваторий. Цель работы — изучение особенностей и изменчивости локальной приземной атмосферной турбулентности и влияния на нее местного рельефа в высокогорной Саянской солнечной обсерватории (ССО).

1. Методы измерений

К основным измеряемым параметрам турбулентной атмосферы относятся: температура воздуха T ; относительная влажность воздуха r ; горизонтальная скорость ветра V ; направление горизонтальной скорости ветра D ; вертикальная скорость ветра w ; интенсивность турбулентности, характеризующая структурной характеристикой флуктуаций показателя преломления C_n^2 ; масштаб Монина—Обухова L ; число Монина—Обухова ζ ; турбулентный масштаб температуры T_* ; турбулентный масштаб скорости

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

ти V_* (скорость трения); временные частотные спектры флуктуаций температуры W_T (и спектры флуктуаций различных компонент вектора скорости ветра); внешний L_0 и внутренний l_0 масштабы турбулентности.

Величины этих параметров зависят от места установки регистрирующих приборов и изменяются во времени. Поэтому для качественного изучения характеристик турбулентной атмосферы в приземном слое необходимы средства оперативного измерения параметров турбулентности вблизи подстилающей поверхности. Мы использовали ультразвуковую метеостанцию АМК-03 [8]. Принцип ее действия заключается в измерении скорости звука, прошедшего между двумя датчиками на измерительном блоке. Станция позволяет регистрировать как мгновенные, с частотой снятия отсчетов в 160 Гц, так и осредненные значения параметров турбулентной атмосферы. В вычислительном блоке метеосистемы применены новые математические алгоритмы обработки накопленных экспериментальных данных.

Метеостанция АМК-03 была установлена на территории ССО в 14 м к востоку от Автоматизированного солнечного телескопа (АСТ). Высота регистрирующего ультразвукового датчика над подстилающей поверхностью составила 4 м. Выбранная точка измерений близка к приемной апертуре телескопа АСТ и достаточно удалена от вносящего искажения в движения воздушных потоков здания телескопа. Характеристики атмосферной турбулентности регистрировались непрерывно следующими друг за другом сериями, каждая длиной 20 мин.

Как известно [1, 2], для регистрации характеристик турбулентности время экспериментальной серии или длина случайной реализации (это время часто называют также интервалом осреднения) обычно не превышает 2 или 3 мин (обычно достаточно 100 с). Такой интервал осреднения захватывает большую часть микрометеорологического (турбулентного) интервала в известном спектре турбулентности Ван дер Ховена [1], что позволяет получать статистически устойчивые осредненные параметры турбулентности. Однако, как было отмечено А.С. Мониним и А.М. Ягломом [1], при горизонтальном переносе крупных компонент турбулентности ($L_0/V > 2-3$ мин) в условиях устойчивой температурной стратификации этого времени недостаточно. Учитывая указанный факт, в настоящей работе авторы производили наблюдения с интервалом осреднения 20 мин (как это принято в метеорологии [1, 7]). Такой интервал позволяет существенно уменьшить разброс экспериментальных данных при устойчивой стратификации. В то же время увеличение времени осреднения до 20 мин практически не изменяет характеристики турбулентности в других температурных стратификациях. Таким образом, в настоящей работе применен новый подход, повышающий точность регистрируемых экспериментальных данных.

2. Результаты измерений и обсуждение

2.1. Характеристики места расположения ССО и условия измерений

Движение воздушных масс над территорией ССО определяется горным рельефом местности. Обсерватория расположена в Саянах на вершине горы Часовые Сопки на высоте 2000 м н.у.м. Территория ССО представляет собой практически ровную площадку, ограниченную с севера и востока склонами ущелья р. Иркут с перепадом высот 700 м. Севернее обсерватории на расстоянии 10–12 км начинается тянувшийся с востока на запад горный массив Восточных Саян высотой более 3000 м. Южнее обсерватории располагается достаточно ровная местность с невысокими холмами и обширными участками почти плоской однородной подстилающей поверхности, понижающаяся до высоты 1645 м к большому (размером $136 \times 36,5$ км) оз. Хубсугул (Монголия) в 22 км от ССО. Высокогорный рельеф, наличие севернее обсерватории стены гор с отдельными вершинами на километр выше горы ССО, влияние оз. Хубсугул с температурой воды, отличающейся от суши, определяют локальные метеорологические условия и астроклимат места расположения ССО.

Измерения проводились в течение двух недель: с 27.07 по 10.08.2023 г.

За время измерений наблюдалась переменная облачность, ясное небо сменяли дожди, при которых влажность воздуха возрастает до значений $r > 75\%$. Данные измерений при дожде могут быть неточными из-за ошибок аппаратуры, поэтому они исключались на этапе обработки. Среднее значение $\langle r \rangle = 63,8\%$. Средняя за весь период измерений температура в относительно стабильных метеоусловиях $\langle T \rangle = 16,1^\circ\text{C}$. Характерные изменения температуры в приземном слое над территорией обсерватории при переходе с ночного на дневное время (за сутки с 03 по 04.08) показаны на рис. 1.

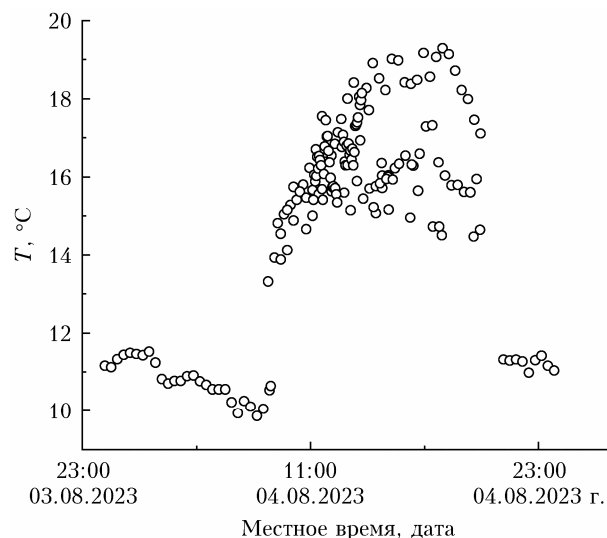


Рис. 1. Изменение температуры воздуха на ССО за сутки

Как видно из рис. 1, максимальный перепад средних дневных и ночных температур составил $\sim 10^\circ\text{C}$ (приблизительно от 11°C ночью до 19°C днем).

2.2. Направление и скорость ветра над территорией ССО

На рис. 2 приведены данные измерений суточного хода направления осредненного горизонтального вектора скорости ветра D вблизи АСТ. В точке наблюдения угол D — это угол между направлением на север и направлением на ту сторону горизонта, откуда дует ветер, отсчитывается от направления на север через восток. Для иллюстрации суточных изменений направления ветра все зарегистрированные данные за время наблюдений нанесены на одну суточную шкалу от 00:00 до 24:00. Таким же образом на рис. 3, 4, 6 проиллюстрированы и другие полученные данные.

Из рис. 2 видно, что во время дневных наблюдений среднее (по всем 20-минутным сериям) значение угла направления ветра $\langle D \rangle \approx 210^\circ$. В меньшем количестве днем также зарегистрированы другие значения около $\langle D \rangle \approx 30^\circ$. Во время ночных наблюдений $\langle D \rangle \approx 60^\circ$. Видно, что дневные и ночные средние значения направления ветра противоположны, отличаются на $\sim 180^\circ$.

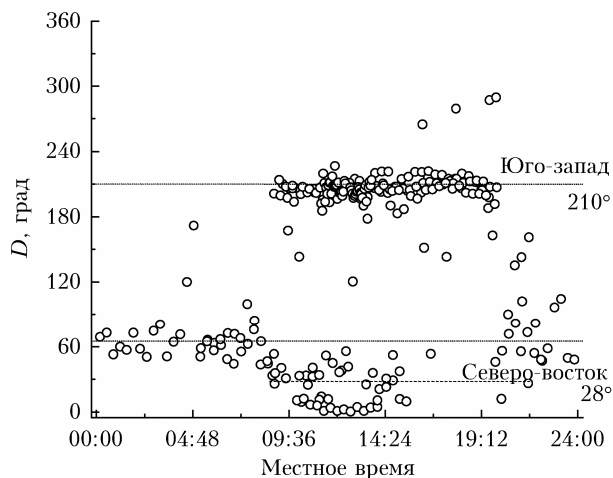


Рис. 2. Направление осредненного вектора скорости ветра вблизи АСТ

Причиной появления в ССО выделенного направления местных ветров является температурный контраст (разность температур) между горным хребтом Саян севернее и ровной долиной южнее ССО. Ночью в летнее время горы остывают быстрее долины, а днем при ясном небе южный склон гор вследствие наклона к солнцу нагревается быстрее. Присутствующий горно-долинный температурный градиент приводит к появлению над горами восходящих (анабатических) ветров днем и нисходящих (катабатических) ночью. Подобно бризовым ветрам, над территорией ССО днем преобладает юго-западный ветер, ночью — северо-восточный.

На рис. 3 приведены данные для горизонтальной скорости ветра. Зарегистрированная средняя скорость горизонтального ветра $\langle V \rangle = 1,9 \text{ м/с}$. Максимальные осредненные за 20 мин значения скорости ветра доходили до 4–5 м/с. Днем $\langle V \rangle \approx 3 \text{ м/с}$, ночью (темное время суток) $\approx 1 \text{ м/с}$.

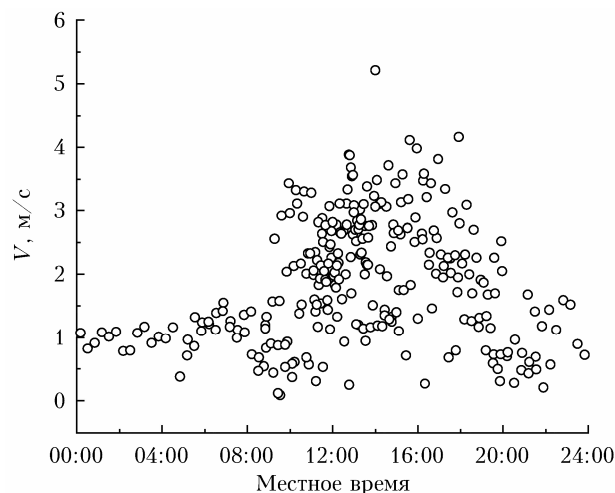


Рис. 3. Средняя скорость горизонтального ветра

Как видно из рис. 3, дневные значения V приблизительно в три раза больше ночных, но не превышают 4 м/с. Невысокая скорость ветра характерна для локальных воздушных потоков, возникающих под воздействием местных температурных, а не более крупномасштабных градиентов [7]. Поэтому рост значений скорости ветра в светлое время показывает, что движения воздушных масс над территорией ССО в основном являются локальными и возникают вследствие температурной неоднородности подстилающей поверхности. Также между V и C_n^2 наблюдается корреляция (рис. 3 и 4). Невысокие скорости ветра приводят в среднем к меньшей интенсивности атмосферной турбулентности над территорией ССО.

2.3. Интенсивность атмосферной турбулентности

Рис. 4 показывает структурную характеристику флуктуаций показателя преломления по данным измерений в ССО. Виден выраженный суточный ход C_n^2 . Приземные значения C_n^2 в течение суток изменяются на порядок и находятся в интервале приблизительно от $2,3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$ ночью до $3,3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$ днем; наблюдается значительное различие в дневных и ночных зарегистрированных данных. Интервал суточного изменения C_n^2 находится в пределах известных средних значений интенсивности атмосферной турбулентности [3]. Среднее за все дни измерений $\langle C_n^2 \rangle = 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$ ниже стандартного среднего для условий открытой ровной местности (обычно степи) в летние месяцы в средних широтах.

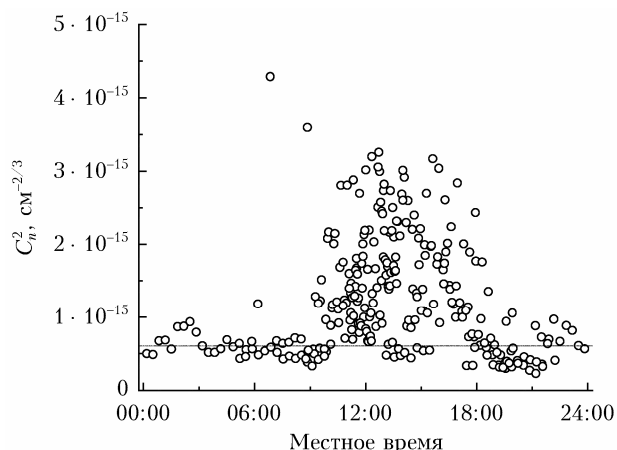


Рис. 4. Структурная характеристика флуктуаций показателя преломления; прямая — среднее значение ночью

В темное время суток, после заката солнца, $\langle C_n^2 \rangle = 6,3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$. В светлое время после восхода солнца оно более чем вдвое выше: $1,4 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$. При этом максимальные в ночное наблюдательное время значения $C_n^2 \leq 9,7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$, что на порядок меньше средних дневных значений C_n^2 , которые сами по себе ниже стандартных [3]. Следовательно, по параметру C_n^2 территория горной обсерватории ССО отличается от других географических пунктов с ровной подстилающей поверхностью меньшей интенсивностью турбулентности.

Значительное влияние местных метеоусловий и масс воздуха на характеристики турбулентной атмосферы над территорией ССО в проведенных измерениях подтверждает наличие явной зависимости графиков для V (см. рис. 3) и C_n^2 (см. рис. 4) от T (см. рис. 1).

На рис. 5 приведена гистограмма всех зарегистрированных в 2023 г. значений C_n^2 . Высота столбцов показывает процент попадания значений C_n^2 в заданный шириной столбца ($2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$) интервал. Как видно, более 50% измеренных значений C_n^2 находится в интервале $4 \cdot 10^{-16} - 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$,

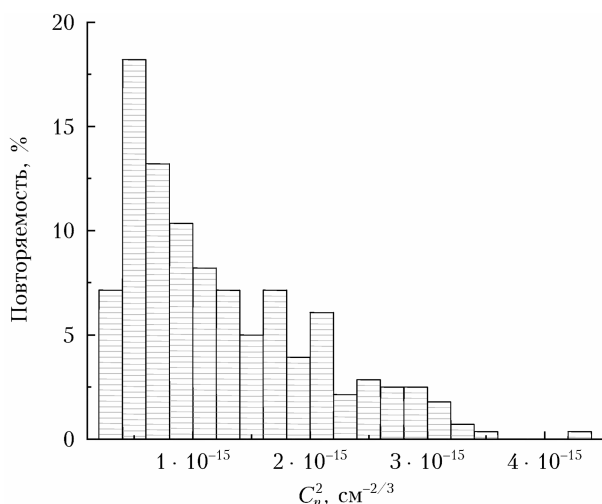


Рис. 5. Гистограмма структурной характеристики флуктуаций показателя преломления

что меньше средней интенсивности турбулентности для условий открытой ровной местности в летние месяцы в средних широтах [3].

2.4. Стратификации атмосферы

Интенсивность атмосферной турбулентности в анизотропном горном пограничном слое зависит также от стратификации атмосферы, характеризующейся числом Монина—Обухова $\zeta = z/L$. В соответствии с теорией подобия Монина—Обухова [1, 2] значения чисел Монина—Обухова для разных стратификаций находятся в следующих диапазонах: $\zeta < -\zeta_0$ ($\zeta_0 = +0,05$) — для неустойчивой, $|\zeta| \leq \zeta_0$ — для безразличной (нейтральной, равновесной), $\zeta > \zeta_0$ — для устойчивой стратификации.

На рис. 6 приведены новые данные для ζ за весь период наблюдений. В экспериментах зарегистрированы изменения ζ в диапазоне от сильной неустойчивости атмосферы с минимальным отрицательным значением $\zeta = -9222,8$ до сильной устойчивости с максимальным значением $+5293,8$. При этом наибольшее количество зарегистрированных значений ζ попадает в гораздо меньший интервал, приблизительно от -30 до $+5$.

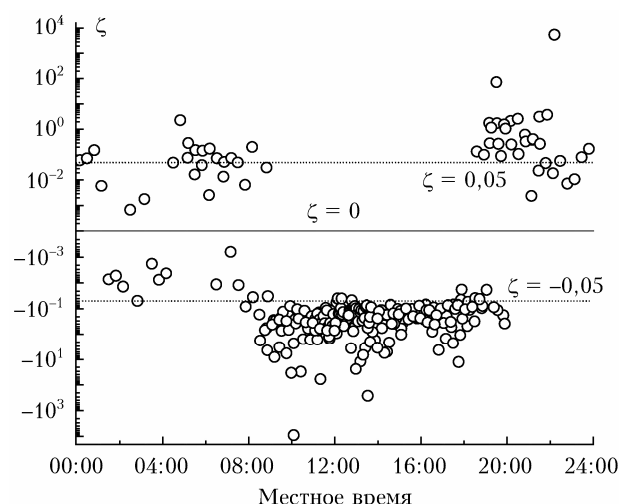


Рис. 6. Суточные изменения числа Монина—Обухова за период измерений

В большинстве дневных измерений $\zeta \leq -0,05$, что соответствует неустойчивой стратификации, при которой обычно наблюдаются вертикальные движения воздуха и развитая турбулентность. Это согласуется с данными для параметра C_n^2 на рис. 4, который также имеет максимальные значения в дневное время. Нейтральная равновесная стратификация, возникающая обычно в динамической турбулентности преимущественно за счет горизонтальных движений, зарегистрирована в основном в ночное темное время. Устойчивая стратификация и низкая интенсивность турбулентности наблюдались в основном в утренние и вечерние часы во время восхода и захода солнца. Таким образом, в измерениях 2023 г. наблюдался суточный ход

стратификации атмосферы (числа Мони́на–Обухова) над ССО.

Все зарегистрированные и осредненные за 20 мин вертикальные движения воздушных масс были незначительны: $\langle w \rangle = \pm 0,3$ м/с. При устойчивой или нейтральной стратификации наблюдались только положительные значения вертикальной скорости ветра ($w > 0$), а движения воздуха вверх ($w > 0$) и вниз ($w < 0$) были зарегистрированы исключительно при неустойчивой стратификации и развитой турбулентности.

2.5. Когерентная турбулентность

Качество регистрируемых астрономических изображений в ССО также зависит от постоянного присутствия в районе наблюдений когерентных структур, которые возникают за неоднородностями рельефа как стабильные роторные возмущения воздушных течений. Как известно [9], в когерентной турбулентности происходит значительное уменьшение как слабых амплитудных, так и фазовых флуктуаций оптического излучения. Среди зарегистрированных в 2023 г. значений W_T также присутствуют характерные для когерентной турбулентности спектры (рис. 7).

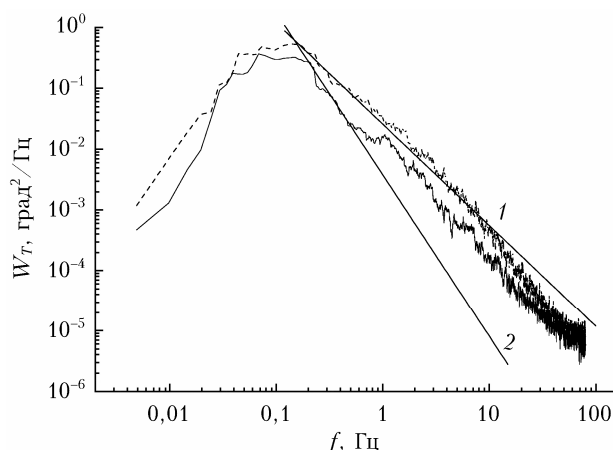


Рис. 7. Временные частотные спектры флуктуаций температуры. ССО, 04.08.2023. Объяснение см. в тексте

На рис. 7 приведены спектры W_T для когерентной и колмогоровской турбулентностей (сплошная и пунктирная кривые). Спектр колмогоровской турбулентности имеет наклон $W_T \sim f^{-5/3}$ (прямая 1). Когерентная турбулентность отличается от колмогоровской в первую очередь более быстрым убыванием сглаженного W_T в инерционном интервале частот ($W_T \sim f^{-8/3}$, прямая 2) и меньшим вкладом высокочастотных компонент (мелкомасштабных вихрей) [9]. Поэтому в атмосфере, в областях с определяющим влиянием одной местной когерентной структуры, спектр в инерционном интервале имеет два выраженных участка убывания: вначале наблюдается достаточно быстрое степенное убывание (обычно $\sim f^{-8/3}$, иногда даже быстрее), затем по мере роста частоты убывание замедляется. Следую-

щий — колмогоровский участок — характеризует смесь из продуктов распада других наиболее крупных порождающих структур, присутствующих в атмосфере.

Размеры (диаметры d_i) наибольших энергонесущих вихрей когерентных структур (и соответствующих им внешних масштабов турбулентности L_{0i}) вблизи АСТ можно определить [9] по частотам максимумов f_{mi} временных частотных спектров флуктуаций температуры, возникающих в энергетическом интервале спектров ($d_i \approx 6L_{0i} \approx V_i / (\pi f_{mi})$), где V_i — средняя скорость ветра для частоты f_{mi} . Диаметры наибольших энергонесущих вихрей находились в интервале $d_i \approx 8,3\text{--}27$ м ($f_{mi} = 0,04\text{--}0,08$ Гц, $V_i = 1\text{--}4$ м/с); соответственно $L_{0i} \approx 1,4\text{--}4,5$ м. Этот новый экспериментальный результат означает, что вблизи АСТ внешний масштаб атмосферной турбулентности значительно больше диаметра приемной апертуры телескопа.

2.6. Турбулентные масштабы

В наблюдениях 2023 г. на ССО получены новые экспериментальные данные для турбулентных масштабов продольной горизонтальной скорости ветра V_* (скорость трения) и температуры T_* , являющихся важными характеристиками турбулентности в теории подобия Мони́на–Обухова [1, 2].

В случае плоскопараллельных течений (изотропный пограничный слой) масштабы скорости и температуры связаны с вертикальными производными скорости течения V и абсолютной температуры T выражениями [1, 2]:

$$\frac{dV}{dz} = \frac{V_* \phi(\zeta)}{\alpha z}, \quad \frac{dT}{dz} = \frac{T_* \phi(\zeta)}{z},$$

где $\alpha = 0,4$ — постоянная Кармана; $\phi(\zeta)$ — универсальная функция подобия, задающая тип стратификации. Эти формулы определяют турбулентные масштабы и в свое время [1] были приняты как условия первичных полуэмпирических гипотез (для нейтральной стратификации в изотропном пограничном слое, где $\phi = 1$). Согласно приведенным определениям (через производные) турбулентные масштабы являются в теории подобия некоторыми масштабами флуктуаций температуры и скорости, которые можно рассматривать в качестве меры интенсивности турбулентного флуктуирующего течения. Усложнение данных формул в дальнейшем привело к формулировке полуэмпирических гипотез теории турбулентности в анизотропном пограничном слое [1, 9].

На рис. 8 и 9 показаны результаты эксперимента 2023 г. для турбулентных масштабов T_* и V_* , осредненных по 20-минутным реализациям, как функции от ζ . Зарегистрированные данные для турбулентных масштабов устойчиво группируются около эмпирических зависимостей, показанных на рис. 8, 9 пунктирными линиями. Эти простые

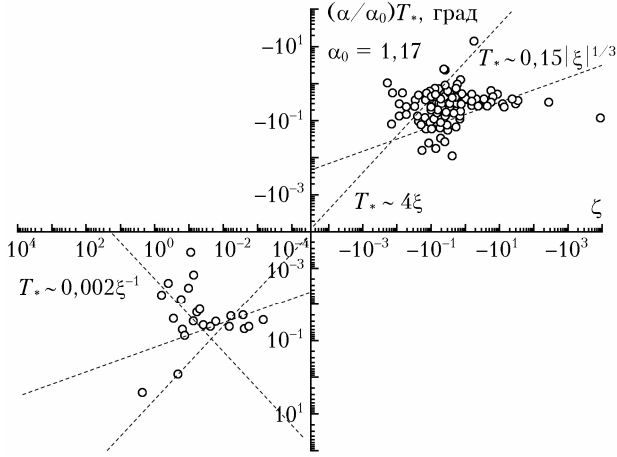


Рис. 8. Турбулентный масштаб температуры в горном анизотропном пограничном слое в зависимости от ζ ; α — обратное турбулентное число Прандтля

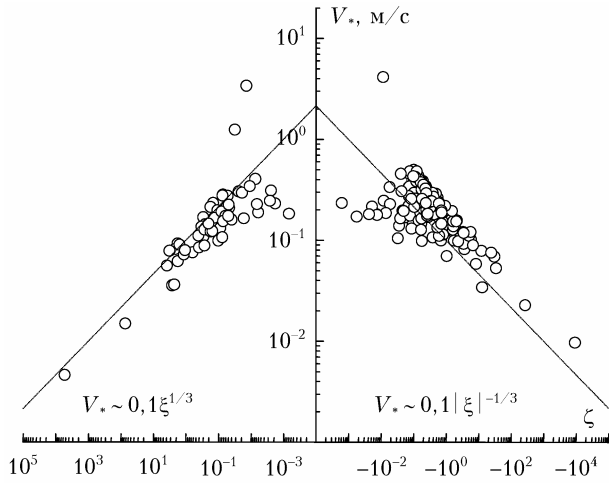


Рис. 9. Турбулентный масштаб скорости в горном анизотропном пограничном слое в зависимости от ζ

асимптотические зависимости V_* и T_* от ζ были экспериментально, а для неустойчивой стратификации атмосферы и теоретически, получены в наших работах [9, 10]:

$$T_* = c_1 \zeta^{1/3}, \quad \zeta < -0,05, \quad V_* = c_2 |\zeta|^{-1/3},$$

где c_1, c_2 — неизвестные константы, подлежащие экспериментальному уточнению; для данных 2023 г. $c_1 \approx 0,15$, $c_2 \approx 0,1$. В измерениях с 20-минутным осреднением проявилась дополнительная (рис. 8) зависимость для турбулентного масштаба температуры $T_* = c_3 \zeta^{-1}$ ($c_3 \approx 0,002$) в интервале ζ приблизительно от 0,02 до 0,2. В наших предыдущих измерениях эта зависимость была зарегистрирована только в отдельных точках. Значение c_3 можно получить по приведенной выше формуле для производной dT/dz , если подставить в нее экспериментальные данные в области положительных чисел ζ для производной и функции подобия $\Phi(\zeta) \approx 10\zeta$ из наших работ [11–13] и асимптотику для $T_* \approx c_3 \zeta^{-1}$. Такое рассчитанное по данным из [11–13] значение c_3 согласуется с ее экспериментальными значениями.

Относительное отклонение данных рис. 8, 9 от асимптотик в основном не превышает 30%. Разброс результатов теории подобия, в том числе данных рис. 8, 9, как установлено в наших работах [9], зависит от локальных свойств турбулентности. Он возникает в основном из-за отклонений спектра турбулентности от колмогоровского.

Заключение

Результаты наблюдений в Саянской солнечной обсерватории в 2023 г. подтверждают, что место ее расположения отличается менее интенсивной турбулентностью по сравнению с другими географическими пунктами с достаточно ровной подстилающей поверхностью в средних широтах.

Показано, что причиной появления в измерениях, полученных в 2023 г., в обсерватории выделенного направления преобладающих местных ветров является температурный горно-долинный градиент между горами Саян севернее и долиной южнее обсерватории.

Подтверждено наличие в районе ССО когерентной турбулентности, в которой уменьшается уровень турбулентных флуктуаций и улучшается качество получаемых оптическими приборами изображений.

Получены новые результаты для турбулентных масштабов температуры T_* и продольной скорости ветра V_* в зависимости от числа Монина–Обухова ζ при увеличенном с 3 до 20 мин интервале осреднения (длине случайной выборки). Такой интервал сглаживает разброс регистрируемых данных. Полученные данные 2023 г. согласуются с ранее установленными авторами асимптотиками для турбулентных масштабов и подтверждают существование эмпирической асимптотики для масштаба температуры $T_* \sim \zeta^{-1}$ при устойчивой стратификации, которая ранее проявлялась редкими точками в небольшом количестве измерений.

Финансирование. Измерения, разработка методологии измерений, анализ и расчеты выполнены в рамках экспедиционного проекта СО РАН «Астроклимат Сибири». Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования возможности детектирования турбулентности разных типов поддержаны научной программой Национального центра физики и математики (проект «Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023–2025»).

Список литературы

1. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 1. М.: Наука, 1965. 639 с.; Т. 2. М.: Наука, 1967. 720 с.
2. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
3. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
4. Миронов В.Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1981. 246 с.

5. Колчинский И.Г. Оптическая нестабильность земной атмосферы по наблюдениям звезд. Киев: Наукова Думка, 1967. 183 с.
6. Щеглов П.В. Проблемы оптической астрономии. М.: Наука, 1980. 272 с.
7. Хромов С.П. Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1948. 696 с.
8. Бозушев А.Я. Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 2. С. 170–174.
9. *Optical waves and laser beams in the irregular atmosphere* / N. Blaunshtein, N. Kopeika (eds.). Boca Raton, London; New York: Taylor & Francis Group, CRC Press, 2018. 334 p.
10. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Турбулентные масштабы теории подобия Монино–Обухова в горном анизотропном пограничном слое // Изв. вузов. Физика. 2020. Т. 63, № 2. С. 55–60. DOI: 10.17223/00213411/63/2/55.
11. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Универсальная функция подобия в теории Монино–Обухова в экстремально устойчивом турбулентном пограничном слое // Тр. XXVIII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. А-36–41. DOI: 10.56820/ОАОРА.2022.17.75.001.
12. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Результаты измерений характеристик функции подобия в горном турбулентном пограничном слое // Тр. XXV Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2020. С. В-315–319.
13. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Результаты измерений вертикальной производной температуры и скорости в горном турбулентном пограничном слое // Тр. XXV Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2020. С. В-304–310.

V.V. Nosov, V.P. Lukin, E.V. Nosov, A.V. Torgaev. Surface turbulence in the Sayan Solar Observatory in summer 2023.

The results of long-term measurements of the atmospheric turbulence characteristics in the Sayan Solar Observatory (SSO) in summer 2023 are presented. It is confirmed that the cause of the prevailing direction of local winds appearing in SSO is temperature mountain-valley gradient between the Sayan Mountains north of the SSO observatory and the valley to the south. A smaller level of the mean intensity of atmospheric turbulence in SSO compared to the turbulence over flat terrain in middle latitudes is confirmed. The presence of coherent turbulence in the SSO area is shown, at which the quality of images obtained by optical instruments is improved. New data are obtained for the turbulent scales of temperature and wind speed depending on the atmospheric stratification.