

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

## **Астроклимат специализированных помещений Большого солнечного вакуумного телескопа. Ч. 1**

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 14.06.2007 г.

Представлены результаты измерений характеристик локального астроклимата в специализированных помещениях Большого солнечного вакуумного телескопа (Байкальская астрофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН). Показано, что температурные градиенты в помещениях телескопа являются причиной возникновения ячейки Бенара и зарождающейся турбулентности в павильоне астрономического спектрографа. Подробно исследованы свойства зарождающейся турбулентности. Установлено, что она вносит значительные ошибки в данные спектральных измерений (даже на трассах малой длины) и вследствие низких частот смещений по оптическим свойствам приближается к регулярной рефракции.

### **Введение**

Как известно [1–4], атмосфера внутри астрономических телескопов (характеризуемая астроклиматическими характеристиками специализированных помещений) может оказывать заметное влияние на качество изображений. Специализированные помещения современных телескопов обычно содержат достаточно протяженные воздушные участки, по которым распространяется оптическое излучение. Для уменьшения влияния атмосферы эти участки оптической трассы должны быть защищены от внешних воздействий, приводящих к флуктуациям показателя преломления. Это достигается употреблением специальных изолирующих материалов, применением герметичных перегородок внутри помещений, а также использованием специализированных закрытых термостатированных павильонов (например, в астрономических спектрографах). В то же время полностью исключить влияние атмосферы не удастся. В рабочих помещениях телескопа возникают собственные воздушные потоки, флуктуации температуры и др. Поэтому исследование и анализ астроклиматических характеристик специализированных помещений телескопа представляют самостоятельный интерес.

В статье приведены результаты измерений характеристик локального астроклимата наиболее важных рабочих участков в специализированных помещениях Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ). К таким участкам внутри телескопа, в первую очередь, относятся астрономический спектрограф (построенный по горизонтальной схеме Эберга и состоящий из закрытого павильона и рабочего места оператора), а также участки вблизи координатного и адаптивного столов. Если павильон спектрографа представляет собой уединенное,

крупное (около  $5 \times 7 \times 16$  м), закрытое, практически теплоизолированное помещение, то участки, соответствующие рабочему месту оператора, координатному и адаптивному столам, являются смежными и располагаются внутри главного зала телескопа.

Для проведения диагностики этих помещений были выполнены измерения основных параметров воздушных потоков: средняя температура  $\langle T \rangle$ , структурные характеристики флуктуаций показателя преломления  $C_n^2$  и температуры  $C_T^2$ , средние скорости горизонтального и вертикального ветра  $V$ ,  $W$ , среднее направление горизонтального ветра  $D$  (отсчитывается от направления на север через восток), масштаб Монина–Обухова  $L$  и параметр локальной температурной стратификации – число Монина–Обухова  $\zeta$ ,  $\zeta = h/L$ , где  $h$  – высота от подстилающей поверхности.

Измерения производились 2 сентября 2006 г. Время измерений (декретное иркутское): 11 ч 30 мин – 13 ч 05 мин. Во время проведения наблюдений небо над телескопом было полностью затянуто облаками, средняя температура наружного воздуха составляла около 11 °С, ветер 3–6 м/с, относительная влажность 80%, атмосферное давление 709 мм рт. ст.

### **1. Аппаратура, используемая для измерений**

Использовалась мобильная ультразвуковая метеосистема «Метео3М» – усовершенствованная модификация метеосистемы, подробно описанной в [3]. В отличие от [3] частота измерений увеличена и составляет 160 Гц. Чувствительность прибора также повышена: 0,002 °С – для температуры и 0,007 м/с – для компонент вектора скорости ветра.

Полоса пропускания чувствительного элемента определяется временем пробега звука через измерительную головку и равна 1,7 кГц. Усреднение, возникающее из-за постоянной времени прибора, приводит к обрезанию высоких частот в спектре турбулентности. Поэтому аппаратура не чувствует неоднородности, размеры которых, например, при средней скорости ветра 1 м/с менее 4–9 мм. Однако это практически не влияет на точность измерения случайных характеристик метеополей.

При измерениях турбулентных параметров время осреднения, как известно, должно выбираться из условия, чтобы масштаб длины осредненного турбулентного течения (средняя скорость ветра, умноженная на время осреднения) существенно превышал внешний масштаб турбулентности по направлению среднего течения (или, что то же самое, время осреднения должно существенно превышать характерный временной масштаб корреляции изучаемого поля). Измерения в приземном слое над ровной поверхностью обычно производят со временем осреднения не менее 100 с [1, 2]. Соответствующий этому времени масштаб длины для скорости ветра 1–10 м/с составляет 0,1–1 км и превышает внешний масштаб турбулентности. При измерениях в закрытом помещении внешний масштаб турбулентности ограничен размерами помещения. Однако реально он значительно (в 5–10 раз) меньше этих размеров. Для времени осреднения 100 с и типичной скорости ветра 0,05–0,5 м/с масштаб длины составляет 5–50 м и превышает внешний масштаб, наблюдающийся в помещениях. Поэтому в закрытых помещениях измерения также можно проводить с осреднением 100 с. В наших экспериментах время осреднения при регистрации параметров турбулентности в одной точке составляло 2 мин.

Относительная погрешность измерений структурных характеристик  $C_T^2$ ,  $C_n^2$ ,  $C_V^2$  определяется, в первую очередь, чувствительностью прибора и уменьшается с увеличением средней скорости ветра, времени осреднения и самих значений структурных характеристик. Так, например, в условиях относительно слабой турбулентности ( $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$ ) при времени осреднения 2 мин и средней скорости ветра 0,5–10 м/с относительная погрешность измерений величины  $C_n^2$  находится в диапазоне 0,4–14% (0,4; 7; 14% – соответственно для скорости ветра 10; 1; 0,5 м/с). С такими же ошибками измеряются и характеристики  $C_T^2$ ,  $C_V^2$ .

## 2. Схемы измерений

Измерения проводились в наиболее важных рабочих участках помещений телескопа. К таким специализированным участкам с различным функциональным назначением относятся астрономический спектрограф, координатный и адаптивный столы. Спектрограф состоит из закрытого павильона (отдельное помещение) и рабочего места оператора. Участки, соответствующие рабочему месту оператора, координатному и адаптивному столу,

располагаются внутри главного зала телескопа. Данные регистрировались на различных высотных уровнях. Точки наблюдения выбраны таким образом, чтобы получить достаточно полную картину астроклиматических характеристик.

### 2.1. Спектрограф

В спектрографе измерения проводились в закрытом павильоне спектрографа (на двух высотных уровнях), а также на участке оптической трассы, соединяющем выходной люк вакуумной трубы телескопа БСВТ и входное окно спектрографа. На этом участке (который находится снаружи павильона спектрографа и обычно называется рабочим местом оператора) оптическое излучение выходит из люка вакуумной трубы и входит в павильон спектрографа.

В павильоне оптическое излучение из входного окна попадает на диагональное зеркало (коллиматор), отражается и падает на дифракционную решетку, которая разлагает падающее на нее излучение в пространственный спектр по длинам волн. Далее, излучение от дифрешетки падает на камерное зеркало, отражается от него, фокусируется и попадает на выходные щели. За выходными щелями (с внешней стороны восточной стены павильона на рабочем месте оператора) расположен фотоприемник (ПЗС-камера) [4].

Схема спектрографа БСВТ приведена на рис. 1.

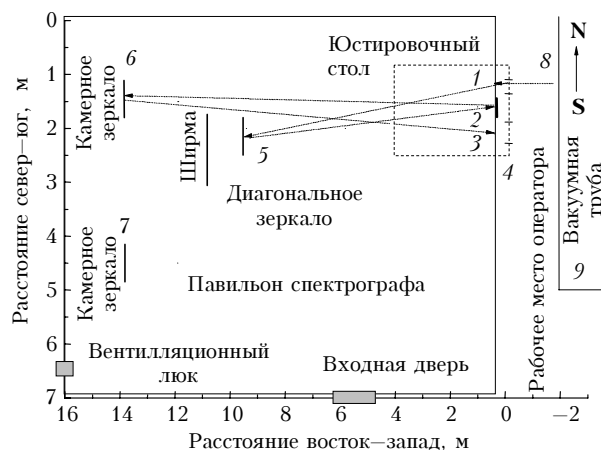


Рис. 1. Схема астрономического спектрографа БСВТ (вид сверху)

Схема измерений в павильоне показана на рис. 2, а схему измерений на рабочем месте оператора см. на рис. 5.

Павильон представляет собой вытянутое вдоль направления запад–восток, уединенное крупное закрытое прямоугольное помещение примерно  $5 \times 16 \times 7$  м (высота, длина, ширина). Внутренние поверхности помещения гладкие, стены без окон. С южной стороны находится входная (двойная) дверь, в юго-западном верхнем углу павильона имеется вентиляционный люк ( $0,5 \times 0,5$  м).

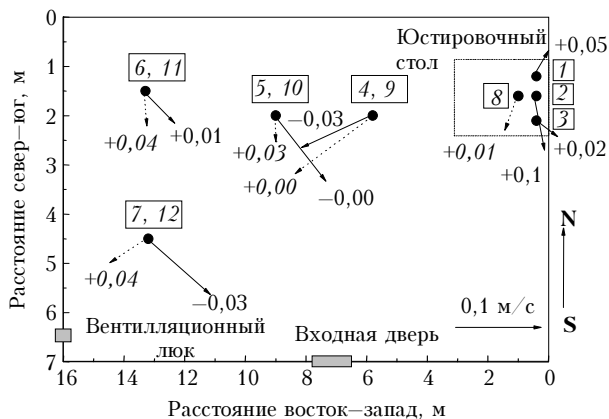


Рис. 2. Павильон спектрографа. Схема измерений внутри павильона (вид сверху) и ветровая карта. Цифры внутри прямоугольников — номера точек измерений. Цифры возле концов стрелок со знаком «+» или «-» — значения вертикального ветра (м/с). Сплошные стрелки и некурсивные цифры — вектор скорости вниз павильона (1–7), пунктирные стрелки и курсивные цифры — вверх (8–12). В правом нижнем углу показан масштаб скорости

В восточной стене павильона (над юстировочным столом) на высоте 1,10 м от пола находятся: входное окно спектрографа (вертикальная щель переменной ширины 1–3 мм и высотой 30 мм, в оправе диаметром около 10 см) и две узкие горизонтальные выходные щели. На столе вблизи стены размещена дифракционная решетка (20×30 см). На полу установлены два камерных зеркала (их диаметры 59,8 и 60,3 см) и диагональное (коллиматор, диаметр 28,4 см). Центры зеркал находятся на высоте оптической трассы 1,10 м. За диагональным зеркалом расположена плоская деревянная ширма (прямоугольник приблизительно 1,10×1,30 м), нижний край которой находится на высоте около 80 см). Ширма выполняет функции полевой диафрагмы.

Измерения в павильоне спектрографа были произведены на двух уровнях по высоте от пола. Нижний уровень соответствует высоте оптической трассы в павильоне 1,10 м (точки 1–7 на рис. 2, а также см. рис. 6). Высота верхнего уровня в основном составляла 3,10 м для точек 9–12 (рис. 2, 6) и 2,55 м — для точки 8. Во время измерений входные двери и вентиляционный люк были закрыты.

## 2.2. Координатный стол

Координатный стол представляет собой прямоугольную площадку (около 0,8×0,8 м), расположенную перпендикулярно падающему на нее излучению из вакуумной трубы телескопа. Поверхность стола находится в фокальной плоскости входной линзы телескопа, поэтому на координатном столе возникает четкое изображение солнца. Координатный стол находится под вакуумной трубой, в углублении, ниже уровня пола главного зала помещения БСВТ.

Схема измерений на участке вблизи координатного стола приведена на рис. 3.

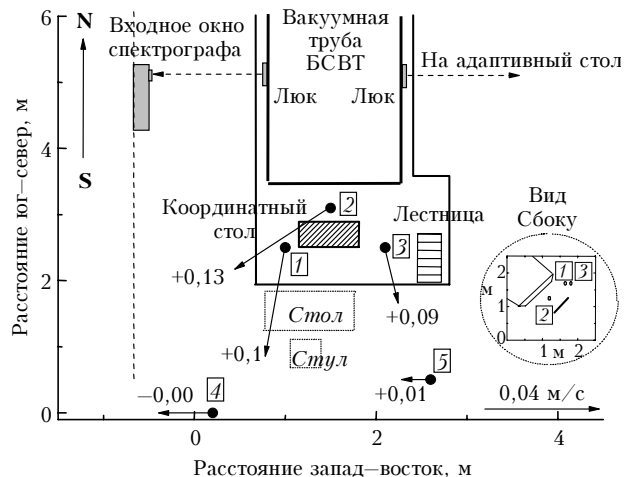


Рис. 3. Координатный стол. Схема измерений вблизи стола (вид сверху) и ветровая карта. Фрагмент в правом нижнем углу дает вид на координатный стол сбоку (с запада). Цифры внутри прямоугольников — номера точек измерений. Сплошные стрелки — вектор горизонтальной скорости (масштаб — в правом нижнем углу). Цифры возле концов стрелок со знаком «+» или «-» — значения вертикального ветра, м/с

Измерения производились в следующих точках. Точки 1, 3 расположены по краям координатного стола, а точка 2 — в середине. Точка 1 находится около 0,7 м западнее центра координатного стола и около 0,3 м южнее южного края координатного стола, 2 — в центре расстояния между вакуумной трубой БСВТ и координатным столом (на оптической оси телескопа), 3 — около 0,7 м восточнее центра координатного стола и около 0,3 м южнее южного края координатного стола. Точки 4, 5 вынесены за пределы участка координатного стола (находящегося в углублении) и расположены выше уровня пола главного зала. Точка 4 находится на 3,5 м южнее нижнего торца вакуумной трубы БСВТ и на 2,4 м западнее лестницы, 5 — напротив лестницы и на 1,5 м южнее верха лестницы.

## 2.3. Адаптивный стол

Адаптивный стол представляет собой массивную плоскую металлическую плиту размером 0,2×1,2×2,4 м, на которую размещается оборудование для адаптивной коррекции изображений. Стол находится напротив восточного люка вакуумной трубы и установлен таким образом, что его большая часть располагается в главном зале, а меньшая — во вспомогательном служебном помещении. В стене над столом имеется квадратный проем размером 1,3×1,6 м. Этот проем может быть закрыт, когда оборудование адаптивного стола не используется. Во время измерений указанный проем в стене над адаптивным столом был открыт. Была открыта также дверь (рис. 4) между главным залом и вспомогательным помещением (восточнее зала). Другая (входная) дверь во вспомогательном помещении была закрыта, так что атмосфера этого помещения

соединялась только с главным залом (схему измерений на участке вблизи адаптивного стола см. на рис. 4).

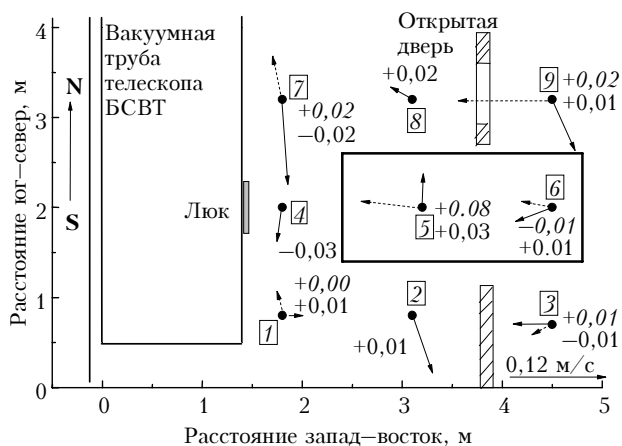


Рис. 4. Адаптивный стол. Схема измерений (вид сверху) и ветровая карта. Цифры внутри прямоугольников – номера точек измерений. Цифры возле точек измерения со знаком «+» или «-» – значения вертикального ветра (м/с). Сплошные стрелки и некурсивные цифры – вектор скорости внизу зала (т. 1–9), пунктирные стрелки и курсивные цифры – вверх (т. 1, 3, 5–7, 9). Масштаб горизонтальной скорости – справа внизу

### 3. Результаты измерений

Рабочее место оператора спектрографа, координатный и адаптивный столы являются различными (примыкающими друг к другу) участками главного зала телескопа. Следовательно, данные измерений характеристик воздушных потоков на этих участках в совокупности дадут распределение астроклиматических характеристик внутри главного зала. В то же время указанные участки относятся к разным функциональным системам телескопа. Поэтому для оценки влияния внутренней атмосферы телескопа на работу его функциональных систем удобно изложить результаты измерений отдельно для каждой такой системы.

Рассмотрим вначале результаты, полученные для участков внутри главного зала телескопа (пп. 3.1–3.3). Данные измерений в закрытом павильоне спектрографа используются в статье для оценок искажений наблюдаемых спектров, возникающих за счет атмосферы павильона (дополнительные смещения спектральных линий). Поэтому эти данные рассмотрены более подробно, они обсуждаются далее в п. 3.4.

### 3.1. Координатный стол

В табл. 1 и на рис. 3 приведены результаты измерений основных астроклиматических характеристик атмосферы вблизи координатного стола БСВТ. Точки наблюдения 1–3 находятся в углублении вблизи стола, точки 4, 5 – выше уровня пола зала и южнее стола (см. п. 2.2). Как видно из данных табл. 1, в измерениях ниже уровня пола главного зала помещения БСВТ, справа и слева от координатного стола (точки 1, 3), наблюдается повышенный уровень флуктуаций температуры ( $C_n^2 = 17,2 \div 29,0 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$ ). В этих же точках имеется сильная локальная температурная неустойчивость,  $\zeta = -365; -72$ . В соответствии с определением числа Монина–Обухова  $\zeta$  это означает, что энергия, затрачиваемая на преодоление вертикальных архимедовых сил, существенно превышает энергию горизонтальных сил трения (рейнольдсовых напряжений). Поэтому при наличии сторонних тепловых возмущений окрестности точек 1, 3 будут источниками роста турбулентных движений. В точке 2, находящейся на оптической оси телескопа (между вакуумной трубой и координатным столом), локальная стратификация также неустойчива,  $\zeta = -5,31$ , но не такая сильная как в точках 1, 3. Кроме того, здесь и структурная характеристика на порядок меньше ( $C_n^2 = 5,8 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$ ).

Координатный стол является центральным участком главного зала, и картина распределения движений воздуха на нем находится в соответствии с прилегающими к нему рабочим местом оператора и адаптивным столом (см. рис. 1, 3–5).

Скорости ветра в точках 1–3 (см. рис. 3) имеют малые горизонтальные составляющие на запад и направлены в основном вверх. Вертикальная составляющая скорости ветра в точках 1–3 вблизи координатного стола приблизительно совпадает со средним значением скорости ветра вблизи адаптивного стола, и в среднем в 2 раза ниже, чем на рабочем месте оператора. В точках 4, 5 вблизи южной стены главного зала ветер практически отсутствует (см. рис. 3). Флуктуации температуры также слабые:  $C_n^2 = 2,7 \div 6,3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$  (см. табл. 1). Это является следствием удаленности указанных точек от основных воздушных потоков, наблюдаемых в зале.

### 3.2. Адаптивный стол

В табл. 2 и на рис. 4 приведены результаты измерений основных астроклиматических характеристик атмосферы вблизи оптического адаптивного стола БСВТ.

Таблица 1

Результаты измерений характеристик воздушных потоков вблизи координатного стола										
№ точки наблюдения	$h$ , м	$\langle T \rangle$ , °C	$C_n^2$ , $\text{см}^{-2/3}$	$C_T^2$ , $\text{град}^2/\text{см}^{2/3}$	$V$ , м/с	$W$ , м/с	$D$ , град	$L$ , м	$\zeta = h/L$	
1	1,8	11,5	$17,2 \cdot 10^{-16}$	$1,97 \cdot 10^{-3}$	0,04	0,10	12,8	-0,0049	-365	
2	1,2	11,7	$5,8 \cdot 10^{-16}$	$6,66 \cdot 10^{-3}$	0,04	0,13	54,2	-0,226	-5,3	
3	1,8	11,5	$29,0 \cdot 10^{-16}$	$3,33 \cdot 10^{-3}$	0,02	0,09	345,6	-0,025	-72	
4	2,5	11,7	$6,3 \cdot 10^{-16}$	$0,73 \cdot 10^{-3}$	0,02	-0,00	90,0	0,093	26,9	
5	2,5	11,6	$2,7 \cdot 10^{-16}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,01	90,0	12,45	0,2	

Таблица 2

## Результаты измерений характеристик воздушных потоков вблизи адаптивного стола

№ точки наблюдения	$h$ , м	$\langle T \rangle$ , °C	$C_n^2$ , см <sup>-2/3</sup>	$C_T^2$ , град <sup>2</sup> /см <sup>2/3</sup>	$V$ , м/с	$W$ , м/с	$D$ , град	$L$ , м	$\zeta = h/L$
<i>Измерения на нижнем уровне</i>									
1	1,2	11,4	$77,5 \cdot 10^{-16}$	$8,88 \cdot 10^{-3}$	0,02	0,01	270,0	-0,344	-3,5
2	1,2	11,3	$2,2 \cdot 10^{-16}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$	0,09	0,01	340,2	1,607	0,8
3	1,7	13,1	$1,6 \cdot 10^{-16}$	$0,19 \cdot 10^{-3}$	0,05	-0,01	90,0	-7,130	-0,2
4	1,2	11,3	$15,9 \cdot 10^{-16}$	$1,81 \cdot 10^{-3}$	0,05	-0,03	5,4	-1,275	-0,9
5	2,1	11,8	$71,1 \cdot 10^{-16}$	$8,21 \cdot 10^{-3}$	0,04	0,03	183,7	-0,088	-24,2
6	2,1	13,4	$2,0 \cdot 10^{-16}$	$2,38 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,01	65,6	-0,091	-23,4
7	1,2	11,0	$0,5 \cdot 10^{-16}$	$0,06 \cdot 10^{-3}$	0,12	-0,02	353,4	-1,003	-1,2
8	1,6	12,1	$95,2 \cdot 10^{-16}$	$11,06 \cdot 10^{-3}$	0,03	0,02	126,0	-0,164	-9,8
9	1,7	13,5	$161,8 \cdot 10^{-16}$	$19,13 \cdot 10^{-3}$	0,08	0,01	336,2	-1,506	-1,2
<i>Измерения на верхнем уровне</i>									
1	2,5	12,1	$4,7 \cdot 10^{-16}$	$0,55 \cdot 10^{-3}$	0,03	0,00	155,86	0,637	3,9
3	2,5	13,7	$2,5 \cdot 10^{-16}$	$0,29 \cdot 10^{-3}$	0,03	0,00	58,52	0,318	7,7
5	2,7	12,3	$12,9 \cdot 10^{-16}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,07	0,08	98,80	-0,384	-7,1
6	2,7	13,7	$1,3 \cdot 10^{-16}$	$0,16 \cdot 10^{-3}$	0,04	-0,01	109,31	-0,045	-60,7
7	2,5	12,1	$6,4 \cdot 10^{-16}$	$0,75 \cdot 10^{-3}$	0,07	0,02	168,79	0,113	21,7
9	2,5	13,7	$6,3 \cdot 10^{-16}$	$0,74 \cdot 10^{-3}$	0,12	0,02	90,00	-1,619	-1,5

Точки наблюдения 1, 4, 7 находятся рядом с восточной стороной вакуумной трубы; точки 2, 8 — по разным сторонам стола; 5, 6 — непосредственно над столом; точки 3, 6, 9 располагаются внутри вспомогательного служебного помещения, примыкающего к главному залу БСВТ.

Как видно из данных табл. 2, в измерениях вблизи адаптивного стола, выполненных на нижнем уровне, наблюдается контрастная картина флуктуаций температуры и показателя преломления. Наибольшие значения  $C_n^2$  зарегистрированы вблизи лестницы, поднимающейся от координатного стола на уровень пола главного зала БСВТ (точка 1), над адаптивным столом (точка 5) и вблизи открытого дверного проема, ведущего из служебного помещения в главный зал (точки 8, 9). В других точках на нижнем уровне, а также на верхнем уровне измерений, значения  $C_n^2$  на 1–2 порядка меньше.

На нижнем уровне измерений в большинстве точек число Монина–Обухова отрицательно (локальная неустойчивость). Наибольшая неустойчивость ( $\zeta = -24,2; -23,4$ ) наблюдается в точках 5, 6 (см. рис. 4), находящихся над столом по разные стороны квадратного проема в стене. В измерениях на верхнем уровне, наоборот, зафиксирована устойчивая температурная стратификация, кроме тех же двух точек 5, 6 над столом ( $\zeta = -60,7$  в 6). Такая неустойчивость обусловлена значительными градиентами средней температуры воздуха над массивным и более нагретым адаптивным столом.

Как видно из рис. 4, на нижнем уровне измерений непосредственно над столом воздушный поток направлен из вспомогательного служебного помещения через квадратный проем в стене, минуя который поворачивает над столом на север. В глав-

ном зале вблизи стола (точки 1, 2, 4, 5, 7, 8, на рис. 4) на нижнем уровне образуется круговой поток воздуха, закрученный против часовой стрелки. На верхнем уровне движение воздуха направлено из вспомогательного служебного помещения в главный зал, а в нем вдоль вакуумной трубы с юга на север и вверх, в противоположном по сравнению с нижним уровнем направлении. В целом из анализа картины распределения скоростей вблизи адаптивного стола следует, что в главном зале БСВТ имеются встречные воздушные течения. Более холодный воздух движется понизу из верхнего этажа БСВТ в главный зал. Более теплый воздух, наоборот, движется поверху из главного зала на верхний этаж БСВТ.

### 3.3. Спектрограф. Рабочее место оператора

В табл. 3 и на рис. 5 приведены результаты измерений основных астроклиматических характеристик атмосферы на рабочем месте оператора спектрографа БСВТ. Рабочее место оператора находится снаружи восточной стены павильона спектрографа (см. рис. 1, 5).

Как видно из табл. 3, на одном конце оптической трассы, соединяющей выходной люк вакуумной трубы с входным окном спектрографа, наблюдается повышенный уровень флуктуаций ( $C_n^2 = 58,5 \cdot 10^{-16}$  см<sup>-2/3</sup>, точка 2), а на другом, наоборот, пониженный ( $C_n^2 = 8,5 \cdot 10^{-16}$  см<sup>-2/3</sup>, точка 1). В окрестности трассы, как ниже ее (на 0,5 м, точка 5), так и слева и справа выше ее (на 0,7–1,2 м, точки 3, 4), уровень флуктуаций промежуточный между точками 1, 2.

Таблица 3

## Результаты измерений характеристик атмосферы на рабочем месте оператора спектрографа

№ точки наблюдения	$h$ , м	$\langle T \rangle$ , °C	$C_n^2$ , см <sup>-2/3</sup>	$C_T^2$ , град <sup>2</sup> /см <sup>2/3</sup>	$V$ , м/с	$W$ , м/с	$D$ , град	$L$ , м	$\zeta = h/L$
1	1,2	11,6	$8,5 \cdot 10^{-16}$	$0,98 \cdot 10^{-3}$	0,16	-0,01	2,4	-1,83	-0,7
2	1,2	11,8	$58,5 \cdot 10^{-16}$	$6,75 \cdot 10^{-3}$	0,08	0,01	1,9	-1,29	-0,9
3	2,3	12,0	$19,0 \cdot 10^{-16}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,04	0,05	104,4	-0,13	-17,2
4	1,8	12,0	$15,9 \cdot 10^{-16}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,04	341,5	-6,16	-0,3
5	0,6	11,8	$18,2 \cdot 10^{-16}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	0,23	0,03	75,7	-0,44	-1,4

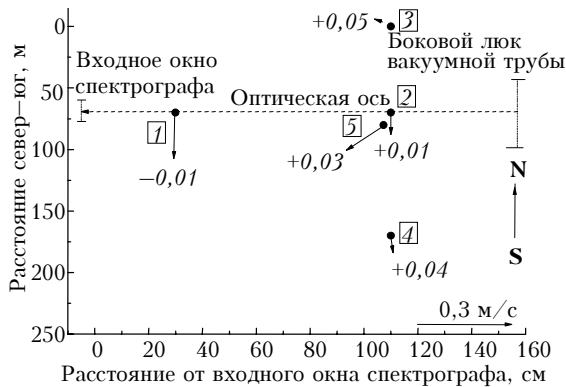


Рис. 5. Рабочее место оператора спектрографа. Схема измерений (вид сверху) и ветровая карта. Цифры в прямоугольничках – номера точек измерений. Стрелки – вектор горизонтальной скорости (масштаб – в правом нижнем углу). Цифры возле концов стрелок со знаком «+» или «-» – значения вертикального ветра, м/с

Из данных рис. 5 следует, что на рабочем месте воздух движется вверх (вытекая из углубления под вакуумной трубой БСВТ) и на юг (к южной стене главного зала, вдоль его западной стены). Здесь наблюдается поток воздуха, поднимающийся от координатного стола и закручивающийся (против часовой стрелки, если, стоя в центре зала, смотреть на запад) в направлении южной стены зала, где имеются окна и двери.

## 3.4. Павильон спектрографа

## 3.4.1. Общие результаты измерений в павильоне

В табл. 4 приведены результаты измерений основных астроклиматических характеристик атмосферы внутри павильона спектрографа. Как видно из данных табл. 4 и рис. 6, в павильоне наблюдается высокий уровень флуктуаций температуры и показателя преломления. Например, в нижних измерениях (на высоте оптической трассы 1,10 м, точки 1–7)  $C_n^2$  достигает  $1,6 \cdot 10^{-14}$  см<sup>-2/3</sup>. Из рис. 6 также видно, что в большинстве случаев структурная характеристика убывает с высотой.

Более подробный анализ данных табл. 4 показывает, что в павильоне в вертикальной плоскости, проведенной через оптическую трассу (через точки 2, 4–6), наблюдается пространственная периодичность некоторых величин (типа шахматной структуры). Например, число Монина–Обухова периодически изменяет знак, средняя температура периодически отклоняется от значения, сглаженного по точкам на одной высоте. На нижнем уровне в этой плоскости периодичны структурные характеристики  $C_T^2$ ,  $C_n^2$ . Аналогичная периодичность имеет место, как мы увидим ниже, для внешнего и внутреннего масштабов турбулентности.

Таблица 4

## Результаты измерений характеристик воздушных потоков внутри павильона спектрографа

№ точки наблюдения	$h$ , м	$\langle T \rangle$ , °C	$C_n^2$ , см <sup>-2/3</sup>	$C_T^2$ , град <sup>2</sup> /см <sup>2/3</sup>	$V$ , м/с	$W$ , м/с	$D$ , град	$L$ , м	$\zeta = h/L$
<i>Измерения на нижнем уровне</i>									
1	1,1	12,0	$94,6 \cdot 10^{-16}$	$10,93 \cdot 10^{-3}$	0,03	0,05	220,3	-0,51	-2,2
2	1,1	12,3	$158,5 \cdot 10^{-16}$	$18,38 \cdot 10^{-3}$	0,06	0,10	349,6	-0,21	-5,2
3	1,1	11,7	$41,4 \cdot 10^{-16}$	$4,78 \cdot 10^{-3}$	0,03	0,02	292,9	-0,83	-1,3
4	1,1	12,3	$143,1 \cdot 10^{-16}$	$16,5 \cdot 10^{-3}$	0,08	-0,03	74,0	2,35	0,5
5	1,1	11,9	$155,8 \cdot 10^{-16}$	$17,93 \cdot 10^{-3}$	0,09	-0,00	315,3	-0,24	-4,6
6	1,1	11,9	$115,8 \cdot 10^{-16}$	$13,42 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,01	315,9	2,27	0,5
7	1,1	11,8	$39,4 \cdot 10^{-16}$	$4,53 \cdot 10^{-3}$	0,09	-0,03	301,6	3,92	0,3
<i>Измерения на верхнем уровне</i>									
8	2,55	11,67	$23,6 \cdot 10^{-16}$	$2,72 \cdot 10^{-3}$	0,04	0,01	28,2	-0,0175	-145,7
9	3,10	11,92	$32,6 \cdot 10^{-16}$	$3,77 \cdot 10^{-3}$	0,10	0,00	76,9	-0,92	-3,4
10	3,10	11,81	$54,6 \cdot 10^{-16}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	0,03	0,03	4,7	-4,12	-0,8
11	3,10	11,84	$42,9 \cdot 10^{-16}$	$4,96 \cdot 10^{-3}$	0,04	0,04	350,3	-0,34	-9,1
12	3,10	11,80	$42,9 \cdot 10^{-16}$	$4,96 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,04	67,2	-0,16	-19,5

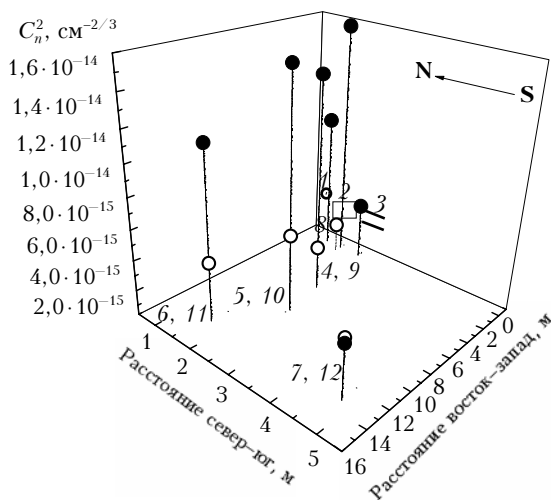


Рис. 6. Структурная характеристика показателя преломления  $C_n^2$  внутри павильона спектрографа. Темные кружки – нижние измерения (т. 1–7), светлые – верхние (т. 8–12). 1 – входное окно; 2 – дифракционная решетка; 3 – выходные щели; 5, 10 – диагональное зеркало; 6, 7, 11, 12 – камерные зеркала; 8 – над юстировочным столом

Такое поведение указанных характеристик связано с возникновением в больших закрытых помещениях устойчивых периодических вихревых образований.

### 3.4.2. Градиенты температуры в павильоне

В соответствии с данными табл. 4 в павильоне наблюдаются заметные градиенты средней температуры. Так, между точками 2 и 8 (вблизи восточной стены) вертикальный градиент достигает значения  $d\langle T \rangle / dh = -0,41$  град/м (средняя температура к потолку уменьшается). Осредненное по всем точкам наблюдения в павильоне значение вертикального градиента составляет  $-0,145$  град/м. Значение продольного горизонтального градиента (вдоль оптической трассы, в направлении восток–запад), осредненного по всем точкам наблюдения на высоте трассы 1,1 м, равно  $-0,028$  град/м (средняя температура уменьшается при переходе от восточной стены к западной). Однако на верхнем уровне измерений (на высоте 3,1 м) этот осредненный градиент существенно уменьшается и становится равным  $+0,009$  град/м.

Больших значений достигает поперечный горизонтальный градиент (поперек оптической трассы, в направлении север–юг). Так, между точками 2, 3 (вблизи восточной стены) он составляет  $-1,16$  град/м (средняя температура уменьшается при переходе от северной стены к южной). Осредненный по точкам наблюдения на высоте трассы этот поперечный градиент равен  $-0,119$  град/м.

Средние градиенты оказываются наибольшими у восточной стены и в центре павильона (в центре, на нижнем уровне – около  $0,143$  град/м и отклоняются от вертикали к востоку под углом  $45^\circ$ , на

верхнем уровне – около  $0,069$  град/м и направлены вниз). Из рассмотрения температурных градиентов по измерениям в спектрографе видно, что наиболее нагреты пол павильона, восточная и северная стены. Если построить сглаженный вектор градиента температуры в павильоне, соответствующий измеренным вертикальным и боковым градиентам, то в первом приближении он будет прямой линией, направленной от потолка вблизи юго-западного угла (вентиляционный люк) к полу вблизи северо-восточного угла павильона (юстировочный стол, входное окно).

Ясно, что главной причиной возникновения градиента средней температуры в павильоне является разность температур окружающего воздуха и подстилающей поверхности. Поэтому величина и направление этого градиента будут зависеть от времени суток и сезона года.

### 3.4.3. Зарождающаяся конвективная турбулентность. Ячейки Бенара

На рис. 2 приведена карта распределения зарегистрированных осредненных движений воздуха внутри павильона (ветровая карта). На нижнем уровне измерений в центре павильона наблюдаются сравнительно сильные встречные ветровые потоки (приблизительно вдоль длины павильона, в направлении восток–запад). Аналогичная ситуация возникает и на верхнем уровне измерений, однако здесь скорость движения существенно уменьшается, а направления движений оказываются смещенными в сторону вентиляционного люка. Вблизи восточной стены большое воздействие на движение воздуха оказывает массивный юстировочный стол. Здесь движения воздуха в основном направлены вдоль и в сторону стены.

Из данных табл. 4 следует, что на высоте оптической трассы при переходе от восточной стороны павильона к западной (через точки 2, 4–6) число Монина–Обухова  $\zeta$ , характеризующее локальную температурную стратификацию, периодически меняет знак. Такая же пространственная периодичность наблюдается и для отклонения  $\Delta T$  ( $\Delta T = \langle T \rangle - \langle T \rangle_{cp}$ ) средней температуры  $\langle T \rangle$  от сглаженной средней температуры  $\langle T \rangle_{cp}$ , рассматриваемой как функция расстояния на пути через точки 2, 4–6. Так,  $\zeta = -5,16$ ,  $\Delta T = -0,04$  град в точке 2;  $\zeta = +0,47$ ,  $\Delta T = +0,29$  град в точке 4;  $\zeta = -4,55$ ,  $\Delta T = -0,07$  град – в 5;  $\zeta = +0,49$ ,  $\Delta T = +0,06$  град – в 6. Эти результаты позволяют выяснить характер осредненного движения в промежутках между точками наблюдения и построить более подробную картину движений.

Действительно, пусть, например, в некоторой точке  $\Delta T > 0$ . Это означает, что объем воздуха в этой точке более нагрет, чем соседние смежные области на этом же высотном уровне. Теплый воздух более легкий, чем холодный, и давление внутри теплого объема меньше. Поэтому холодный воздух должен подтекать под теплый и вытеснять его вверх. Если в той же точке оказывается, что  $\zeta > 0$ ,

то из смысла параметра  $\zeta$  следует, что над точкой наблюдения находится более теплый воздух. В самой же рассматриваемой точке воздух будет более холодным и более тяжелым, чем сверху. Следовательно, при  $\zeta > 0$  возникает сила, запирающая силы плавучести.

Таким образом, при  $\Delta T > 0$ ,  $\zeta > 0$  на объем воздуха в точке наблюдения действуют две вертикальные противоположно направленные силы (как говорят [2], стабилизирующее действие устойчивой стратификации конкурирует с дестабилизирующим влиянием неустойчивого профиля температуры). Эти силы ограничивают вертикальные перемещения воздушного объема, позволяя ему двигаться только горизонтально (например, в точке 4 на рис. 2).

Аналогичная ситуация имеет место и для  $\Delta T < 0$ ,  $\zeta < 0$  (например, в точке 5 на рис. 2). Однако в промежутке между этими областями, когда, например,  $\Delta T > 0$  и число  $\zeta$  из положительного становится отрицательным ( $\Delta T > 0$ ,  $\zeta < 0$ ), обе вертикальные силы оказываются направленными вверх и, следовательно, объем воздуха движется вверх. Такой режим возникает внутри интервала между точками 4, 5 (см. рис. 2). В противоположном случае ( $\Delta T < 0$ ,  $\zeta > 0$ ) обе силы направлены вниз и объем воздуха движется вниз. Такая ситуация будет между точками 2, 4 и вблизи точки 6 на рис. 2.

На основании этих данных можно построить более подробную картину движений воздуха в павильоне в вертикальной плоскости, проведенной через точки наблюдения 2, 4–6). Такая приближенная картина приведена на рис. 7. Наклоненной сплошной линией на рис. 7 показана проекция (на указанную плоскость) направления сглаженного вектора градиента средней температуры в павильоне.

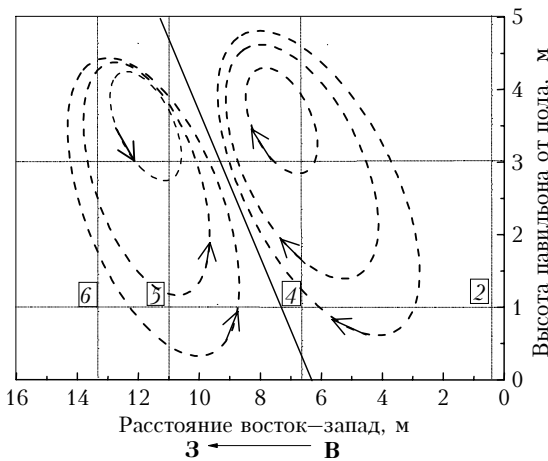


Рис. 7. Картина движения воздуха в павильоне в вертикальной плоскости, проведенной через точки 2, 4–6 (их положение указано цифрами). Эллипсами показаны траектории осредненных движений. Наклоненная сплошная линия — проекция сглаженного градиента средней температуры

Как видно из рис. 7, внутри помещения существуют циркуляционные воздушные потоки (вих-

ри). Осредненное движение воздуха в павильоне аналогично вихревому тороидальному движению жидкости в пространственной ячейке, которой является павильон. Ось ячейки (ось тора) параллельна вектору градиента температуры (наклоненная линия на рис. 7). В центре павильона воздух движется по оси вверх — параллельно направлению градиента, а вблизи стен — вниз.

Данные, представленные на рис. 7, отображают только основные свойства движения воздуха в павильоне, реальные движения будут несколько сложнее. Присутствие искусственных препятствий для потоков (зеркала, ширма и др.) искажает эти вихревые циркуляционные потоки.

Ясно, что циркуляция осредненных потоков вызвана имеющимся внутри павильона градиентом температуры. Эти наблюдаемые вихри можно интерпретировать как конвективные ячейки Бенара [2].

Теоретические модели, из которых следует существование ячеек Бенара, построены уже давно. Как следует из теории, для возникновения ячеек (на которые распадается конвективное движение) требуется градиент температуры между противоположными плоскостями. В зависимости от величины градиента ячейки могут принимать форму шестигранных призм (с осью вдоль вектора градиента) или роликов. В центре таких призм жидкость движется по оси призмы вверх (параллельно направлению градиента), а по краям — вниз, или наоборот. В более сложных (чем две разнесенные плоскости) пространственных областях ячейки могут принимать формы, отличающиеся от шестиугольников.

Эксперименты, проведенные на модельных объектах (сосудах) с использованием в качестве носителя воды, масла, жидкого гелия, подтверждают факт возникновения конвективных ячеек Бенара [2]. Для воздуха внутри больших закрытых помещений такие эксперименты ранее не проводились. Это связано с тем, что для таких экспериментов требуются небольшие по размерам и чувствительные к перемещениям слабых воздушных потоков датчики.

Как известно [2], для возникновения ячеек Бенара (стационарного периодического движения) требуется, чтобы число Рэлея  $Ra$  было больше критического  $Ra_{cr}$ . По определению  $Ra = g\beta h^3(T_0 - T_h)/(v\chi)$ , где  $T_0$  и  $T_h$  — соответственно температуры воздуха внизу иверху слоя толщиной  $h$ ;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\beta$  — коэффициент теплового расширения ( $\beta = 1/T_0$ );  $v$  — кинематическая вязкость;  $\chi$  — температуропроводность воздуха. Подставляя сюда значения параметров ( $T_0 = 285,1$  К;  $T_h = T_0 + hd\langle T \rangle/dh$ ,  $h = 5$  м,  $d\langle T \rangle/dh = -0,145$  град/м;  $v = 1,3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $\nu = 0,7\chi$ ), получаем  $Ra = 1,3 \cdot 10^{10}$ . Критические числа Рэлея  $Ra_{cr}$  согласно [2] находятся в диапазоне  $Ra_{cr} = 657 \div 1708$ . Отсюда видно, что зарегистрированное  $Ra$  существенно превышает критическое ( $Ra \gg Ra_{cr}$ ). Поэтому существуют стационарные периодические движения. Таким образом, данные наших измерений (см. табл. 4, рис. 2



и 7) подтверждают наличие воздушных ячеек Бенара для осредненных движений внутри закрытых помещений.

Исторически теоретическое исследование устойчивости движения жидкости между двумя разнесенными плоскостями (из которого следует существование ячеек Бенара) позволило сформулировать несколько сценариев возникновения (зарождения) турбулентности. В частности, установлено [2, 5], что в условиях неустойчивости конвективных движений в закрытых объемах возникающая турбулентность является неразвитой. Одна часть энергии жидкости приходится на регулярные (ламинарные) движения (вихри в ячейках Бенара), другая — на турбулентные. Ясно, что случайные движения воздуха внутри закрытых помещений представляют собой пример зарождающейся турбулентности. Статистические характеристики зарождающейся неразвитой турбулентности в воздухе практически не изучены [1, 2]. Их экспериментальное исследование, включая сравнение с режимом развитой турбулентности, представляет большой интерес. В этой связи, а также для дальнейшего прогноза влияния турбулентности внутри закрытых помещений на качество астрономических наблюдений мы приведем здесь несколько экспериментальных результатов для наиболее важных вторых статистических моментов зарождающейся турбулентности.

На рис. 8, 9 приведены результаты сравнения экспериментальных данных для основных статистических характеристик флуктуаций температуры воздуха в закрытом помещении и в открытой атмосфере.

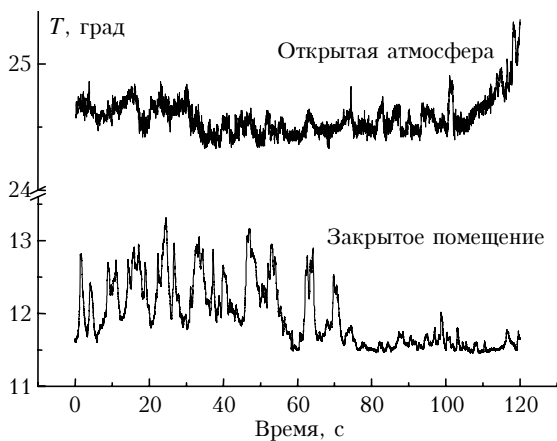


Рис. 8. Реализации случайной температуры  $T$  в закрытом помещении и в открытой атмосфере

Для закрытого помещения данные соответствуют измерениям в точке 5 внутри павильона спектрографа (см. табл. 4,  $\zeta = -4,6$ ,  $C_n^2 = 1,6 \cdot 10^{-14} \text{ см}^{-2/3}$ ,  $h = 1,1 \text{ м}$ ,  $\langle T \rangle = 11,95 \text{ град}$ ,  $V = 0,09 \text{ м/с}$ ). Для открытой атмосферы выбраны типичные экспериментальные данные. Они получены отдельно в летних измерениях над приблизительно ровной подстилающей поверхностью при ясной сухой погоде ( $\zeta = -3,8$ ,  $C_n^2 = 6,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$ ,  $h = 3,1 \text{ м}$ ,  $\langle T \rangle = 24,56 \text{ град}$ ,  $V = 0,86 \text{ м/с}$ ).

Как видно из рис. 8, на котором представлены двухминутные реализации случайной температуры, для открытой атмосферы случайный процесс флуктуаций близок к стационарному. В условиях закрытого помещения процесс флуктуаций четко разделен на два интервала с разными турбулентными режимами, причем один режим сменяет другой дискретным скачком. Скачок демонстрирует появление из одного стационарного течения другого стационарного с новыми характеристиками. Это явление называется бифуркацией смены устойчивости [2].

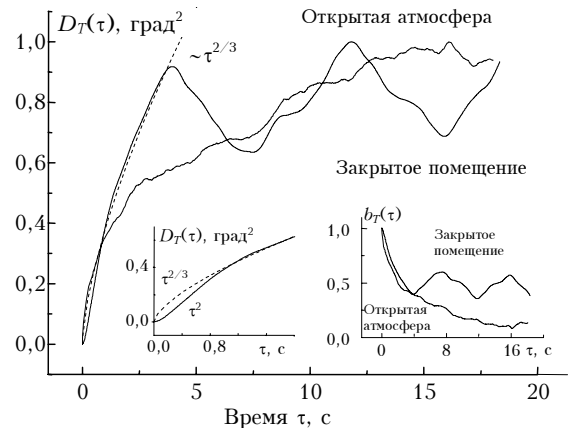


Рис. 9. Нормированные структурная  $D_T(\tau)$  и корреляционная  $b_T(\tau)$  функции в закрытом помещении и в открытой атмосфере (слева внизу показан начальный участок  $D_T(\tau)$ )

Из рис. 9 следует, что структурные функции флуктуаций температуры  $D_T(\tau)$  как в развитой, так и в неразвитой турбулентности при малых разностях  $\tau$  являются колмогоровскими ( $D_T \sim \tau^{2/3}$ ). При больших разностях они существенно отличаются. Коэффициент корреляции флуктуаций  $b_T$  внутри закрытого помещения, в отличие от открытой атмосферы, имеет ряд локальных максимумов. Максимумы достаточно большие. Каждому такому максимуму в коэффициенте корреляции отвечает локальный минимум структурной функции  $D_T$  (их аргументы совпадают).

При очень малых  $\tau$  структурная функция  $D_T(\tau)$  в закрытом помещении имеет квадратический участок (см. рис. 9, график внизу слева), более протяженный, чем в открытой атмосфере, что соответствует увеличенным значениям внутреннего масштаба турбулентности. Этот факт нужно учитывать в алгоритмах расчета структурных характеристик  $C_T^2$ ,  $C_n^2$ ,  $C_V^2$ .

Таким образом, было показано, что температурные градиенты в помещениях БСВТ являются причиной возникновения ячейки Бенара и зарождающейся турбулентности в павильоне астрономического спектрографа. Подробно исследованы свойства зарождающейся турбулентности.

Работа выполнена при финансировании в рамках комплексного интеграционного проекта СО РАН № 3.2 «Развитие адаптивных систем коррекции изображения для наземных телескопов» и Программы

Президиума РАН № 16. Часть 3. Проект 1. «Дневной астроклимат и проблемы построения адаптивного телескопа».

1. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
2. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Т. 1. М.: Наука, 1967. 696 с.; Т. 2. СПб: Гидрометеоздат, 1996. 742 с.

3. *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. 845–862.
4. *Skomorovsky V.I., Firstova N.M.* The large solar vacuum telescope: the optical system, and first spectral observations. Solar Physics. Belgium: Kluwer Ac. Publ. V. 163. 1996. P. 209–222.
5. *Жигулев В.Н., Тумин А.М.* Возникновение турбулентности. Новосибирск: Наука, 1987. 283 с.

*V.V. Nosov, V.M. Grigor'ev, P.G. Kovadlo, V.P. Lukin, E.V. Nosov, A.V. Torgaev.* **Astroclimate of specialized rooms of the Large solar vacuum telescope. P. 1.**

Results of measurements of characteristics of local astroclimate in specialized rooms of the Large solar vacuum telescope (Baikaliskaya astrophysical observatory ISZF SB RAS) are presented. It is shown that temperature gradients in the rooms of the telescope are reasons of arising the Benard's cells and turbulence in pavilion of the astronomical spectrograph. The explored characteristics of incipient turbulences are studied in detail. It is shown that incipient turbulence contributes significant errors in spectral measurements, even on paths of a small length. As a consequence of low frequencies of shifts, the incipient turbulence in optical characteristic approaches to regular refraction.