



Серия «Науки о Земле»
2009. Т. 2, № 2. С. 105–116
Онлайн-доступ к журналу:
<http://isu.ru/izvestia>

ИЗВЕСТИЯ
*Иркутского
государственного
университета*

УДК 551.593:551.510

Результаты структурных измерений параметров приземного слоя атмосферы на площадке Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН

П. Г. Ковадло (kovadlo2006@rambler.ru),
П. А. Найденов (a-priori@pavelnaydenov.com),
А. Ю. Шиховцев (artepochta2009@rambler.ru)

Аннотация. С целью разработки методики расчетов турбулентного режима и оптимизации условий работы крупных солнечных телескопов проведены структурные измерения параметров воздуха: средних значений и флуктуаций температуры, полного вектора скорости ветра, а также средней относительной влажности и давления воздуха на площадке павильона Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) Байкальской астрофизической обсерватории (БАО) ИСЗФ СО РАН.

Показано, что павильон телескопа способствует образованию и развитию вертикальных турбулентных потоков и увеличивает уровень турбулизации более чем в 2 раза. Выявлены «горячие» участки вдоль луча зрения с повышенной турбулизацией воздуха.

Ключевые слова: турбулентность, флуктуации температуры, оптическая нестабильность атмосферы.

Введение

Байкальская астрофизическая обсерватория (БАО) Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН была создана для исследований физических процессов на Солнце и динамики его тонкой структуры в видимом диапазоне длин волн. Обсерватория располагает четырьмя телескопами для наблюдений Солнца в разных диапазонах длин волн. Самый крупный Большой солнечный вакуумный телескоп (БСВТ) имеет оптическое разрешение лучше 0,2 угловых секунды и предназначен для наблюдений мелко-масштабных элементов и процессов на Солнце. Телескопы установлены на разной высоте от уреза воды на крутом береговом склоне оз. Байкал. На одной из высоких точек берегового гребня (более 200 м над водным зеркалом) расположен БСВТ (рис. 1). Место его установки было выбрано как лучшее из 10 исследованных пунктов на территории юга Восточной Сибири. Критерием отбора пунктов служил, кроме наибольшей продолжительности солнцесияния, минимальный уровень интегральной интенсивности атмосферной турбулентности по вертикали, характеризующий прелом-

ляющие свойства воздуха. Атмосферная турбулентность существенно уменьшает угловое разрешение телескопов (снижает качество изображений), имеющих разрешение лучше одной угловой секунды. Наибольшее влияние оказывают нижние слои атмосферы и, в частности, наиболее турбулизированный приземный слой. Для ослабления его влияния приемную апертуру телескопов стараются поднять на возможно большую высоту, обычно 20–30 м, чтобы не ухудшить устойчивость конструкции от напорного давления ветра. С учетом сказанного, приемное зеркало БСВТ диаметром один метр (показано на врезке рис. 1) поднято на высоту 25 м над подстилающей поверхностью, так что высота его над уровнем Байкала составляет около 280 м.

Чтобы уменьшить нагрев подстилающей поверхности, площадка вокруг телескопа была покрыта слоем мраморной крошки, обладающей высоким альбедо [4]. В условиях, близких к штилевым, тепловые потоки от белой поверхности ослаблены и развиваются на меньшую высоту; при усилении ветра эффект снижается.

Постановка задачи и методика исследований

Перечисленные выше мероприятия, плюс вакуумизация оптической трубы телескопа снижают действие окружающего турбулизированного воздуха на рабочий световой луч, что в итоге увеличивает продолжительность наблюдений с высоким разрешением, однако достигнутого, по современным требованиям, оказывается явно недостаточно. Для того чтобы целенаправленно улучшать качество изображений и повышать эффективность работы телескопа, кроме совершенствования оптико-электронных узлов телескопа, требуется информация о турбулентном режиме окружающего воздуха как снаружи, так и внутри павильона телескопа. Как показывает практика, только на основе этой информации можно успешно разрабатывать методы снижения влияния турбулентности на качество работы телескопа.

В рамках использовавшейся методики было предусмотрено исследование турбулентных параметров воздуха: 1 – на площадке около вертикальной колонны телескопа, 2 – на верхней площадке в подкупольной части самого телескопа, где расположено питающее зеркало, 3 – внутри павильона телескопа: зале спектрографа (западное крыло павильона), зале наблюдателя (центральная часть здания павильона), зале адаптивной оптической системы (восточное крыло павильона).

Площадка, прилегающая к основанию телескопа, размером около 40x15 м была разбита в виде сетки с 12 узлами, в которых на высоте 2 м проводились измерения средних значений и флуктуаций температуры, средних и пульсационных составляющих полного вектора скорости, средней относительной влажности и давления воздуха.



Рис. 1. Большой солнечный вакуумный телескоп Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН

Наблюдения выполнялись при ясном небе в дневные часы (с 11 до 16 ч МДВ) при хорошо развитой турбулентности и средней скорости ветра 3–5 м/с на высоте 25 м.

Оптическая нестабильность атмосферы δ_n оценивалась как среднее квадратическое отклонение флуктуаций показателя преломления воздуха [6]

$$\delta_n \approx \frac{AP}{T^2} \delta_t,$$

или для стационарных условий $\delta_n \sim \delta_t$, где δ_t – среднее квадратическое отклонение флуктуаций температуры, T по Кельвину – температура воздуха, P – давление, A – размерный коэффициент, зависящий от длины волны света. Таким образом, по величине дисперсии флуктуаций температуры можно судить и об интенсивности образования турбулентных воздушных «линз».

Кроме этого, оптическая нестабильность приземного слоя при хорошо развитой турбулентности оценивалась по величине структурного коэффициента флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 [3]

$$C_n^2 = \left(\frac{AP}{T^2} \right)^2 C_n^2 C_T^2,$$

где C_T^2 – структурная функция флуктуаций температуры, определяемая по отношению:

$$C_T^2 = a^2 (Ri) \frac{\chi^{\frac{4}{3}} T_1^2}{z^{\frac{2}{3}}},$$

где $\chi = 0,4$ – постоянная Кармана, z – высота измерений, T_1 – масштаб температуры, имеющий вид

$$T_1 = \frac{d\bar{T}}{d \ln z},$$

α – универсальная функция числа Ричардсона Ri , определяемая из табл. 1:

Таблица 1

Зависимость универсальной функции α от числа Ричардсона

Ri	-0,54	-0,12	-0,02	0,04	0,12	0,43
α (Ri)	2,30	2,16	1,90	1,50	0,91	0,47

Гидродинамическая устойчивость приземного слоя оценивалась градиентным числом Ричардсона по известной формуле [2, 7]:

$$Ri = \frac{\frac{g}{T} \frac{d\bar{T}}{dz}}{\left(\frac{d\bar{v}}{dz} \right)^2},$$

где $\frac{g}{T}$ – параметр плавучести, g – ускорение свободного падения, \bar{T} –

средняя температура слоя, \bar{v} – средняя скорость в слое, $\frac{d\bar{T}}{dz}$ – градиент

средней температуры по высоте z , $\frac{d\bar{v}}{dz}$ – градиент средней скорости ветра по высоте z .

На верхней площадке БСВТ по данным структурных измерений вдоль луча зрения по известному отношению был определен радиус пространственной когерентности поля плоской световой волны r_0 [1, 5, 8].

$$r_0 = \sqrt{\frac{L}{q\omega}},$$

где ω – волновое число, равное $\frac{2\pi}{\lambda}$, λ – длина волны, принятая равной

0,5 мкм, L – внешний масштаб; q – параметр, определяемый как

$$q = 1,22 \beta_0^{\frac{12}{5}},$$

где β_0 – индекс мерцаний, характеризующий дисперсию флуктуаций интенсивности оптической турбулентности в плоской волне

$$\beta_0^2 \approx 1,24 \tilde{N}_n^2 \omega^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}}.$$

Окончательно выражение для определения радиуса пространственной когерентности поля плоской световой волны примет вид:

$$r_0 = \frac{1}{1,26 (C_n \omega)^{\frac{6}{5}} L^{\frac{3}{5}}}.$$

Результаты исследований

На рис. 2 представлено распределение а) средней и б) дисперсии флуктуаций температуры, в) структурного коэффициента флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 , г) числа Ричардсона по прилегающей к телескопу территории (нижняя площадка). Примечание: здесь и далее дисперсия флуктуаций температуры обозначена как °С. Штриховым прямоугольником показано основание вертикальной колонны телескопа. Стрелкой показано направление на север.

Максимальные значения как средней температуры, так и дисперсии ее флуктуаций наблюдаются в северо-западной части площадки, что связано с наличием в этой части кустарника, который обладает термостатирующим эффектом, и нижняя граница приземного слоя формируется уже над кустарником. Можно говорить, что эта часть площадки является «горячей», и здесь требуются мероприятия по снижению возникающих тепловых контрастов. Минимальное же значение дисперсии флуктуаций температуры наблюдается с восточной стороны телескопа. Сравнительно однородное поле дисперсии флуктуаций температуры имеет место в юго-восточной части площадки, поскольку она является более закрытой от набегающих неоднородных потоков, образующихся при обтекании вершины гребня.

Аналогично распределяется по территории площадки и структурный коэффициент флуктуаций показателя преломления воздуха (рис. 2, в, цифры на рисунке обозначают $10^{-16} C_n^2$).

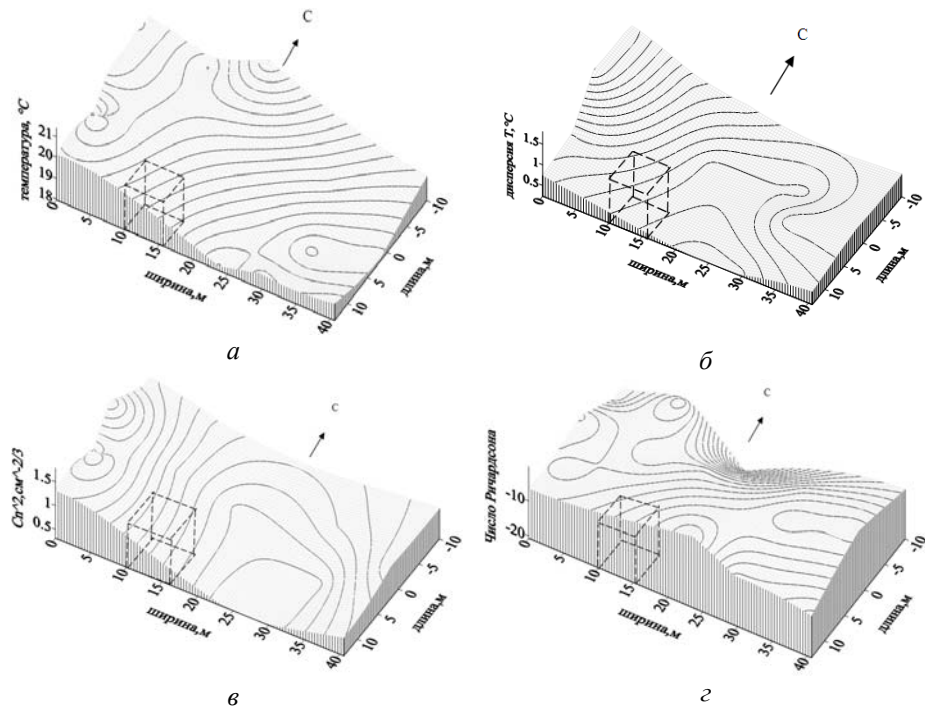


Рис. 2. Распределение: а) средней и б) дисперсии флуктуаций температуры; в) структурного коэффициента флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 ; г) чисел Ричардсона на площадке вертикальной колонны БСВТ

На рис. 2, г показано распределение значений числа Ричардсона. В целом неустойчивость приземного слоя на площадке достаточно высокая, значения Ri около вертикальной колонны достигают значений -5 и ниже. Напомним, что в зависимости от значений числа Ri принято различать неустойчивую ($Ri < 0$, $\frac{d\bar{T}}{dz} < -\gamma_a$), устойчивую ($Ri > 0$, $\frac{d\bar{T}}{dz} > -\gamma_a$) и безразличную ($Ri = 0$, $\frac{d\bar{T}}{dz} = -\gamma_a$) стратификацию атмосферы, где γ_a – сухоадиабатический градиент температуры.

На рис. 3 показано распределение дисперсии флуктуаций температуры на верхней площадке телескопа, имеющей размер 6×6 м, для случаев высоких и низких значений флуктуаций температуры. Стрелкой показано направление на север. Измерения проводились в 12 точках, расположенных в шахматном порядке, на высоте $2,3$ м над площадкой (на уровне центра сидеростатного зеркала) при двух преобладающих направлениях ветра – северо-западном и юго-восточном. На рис. 3, а и б показаны распределения дисперсии флуктуаций температуры и структурного коэффициента флуктуаций показателя преломления при юго-восточном ветре.

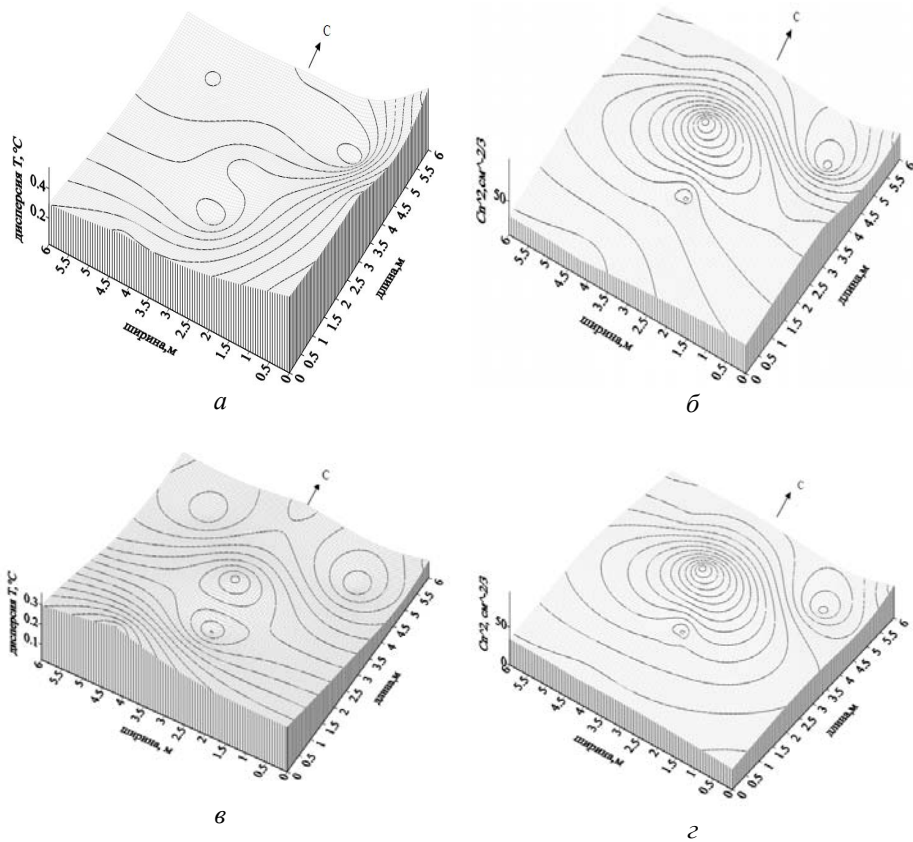


Рис. 3. Распределение дисперсии флуктуаций температуры воздуха а) и в), распределение C_n^2 – структурного коэффициента флуктуаций показателя преломления воздуха б) и г) на верхней площадке вертикальной колонны БСВТ

На краю площадки с наветренной стороны значения дисперсии флуктуаций температуры более высокие – в 1,5–2,0 раза больше, чем на подветренной стороне. Однако «горячая точка», отличающаяся наибольшими значениями структурного коэффициента флуктуаций показателя преломления, наблюдается около зеркала сидеростата. В период низких значений дисперсии флуктуаций температуры картина распределения относительно площадки почти симметрична, однако «горячая точка» также наблюдается около зеркала сидеростата. Отсюда следует, что зеркало сидеростата является повышенным источником флуктуаций температуры, т. е. оптических помех. Чтобы проследить динамику оптических помех, нами были проведены структурные измерения турбулентных характеристик воздуха вдоль луча зрения.

На рис. 4 показаны значения дисперсии флуктуаций температуры и C_n^2 на разных расстояниях от зеркала сидеростата. Из рисунка видно, что флуктуации возрастают с расстоянием от входного (вакуумного) иллюминатора. Такой сценарий исследователями никогда не рассматривался. Обычно флуктуации увеличивались при приближении к объективу телескопа, но не наоборот. Здесь картина складывается следующая.

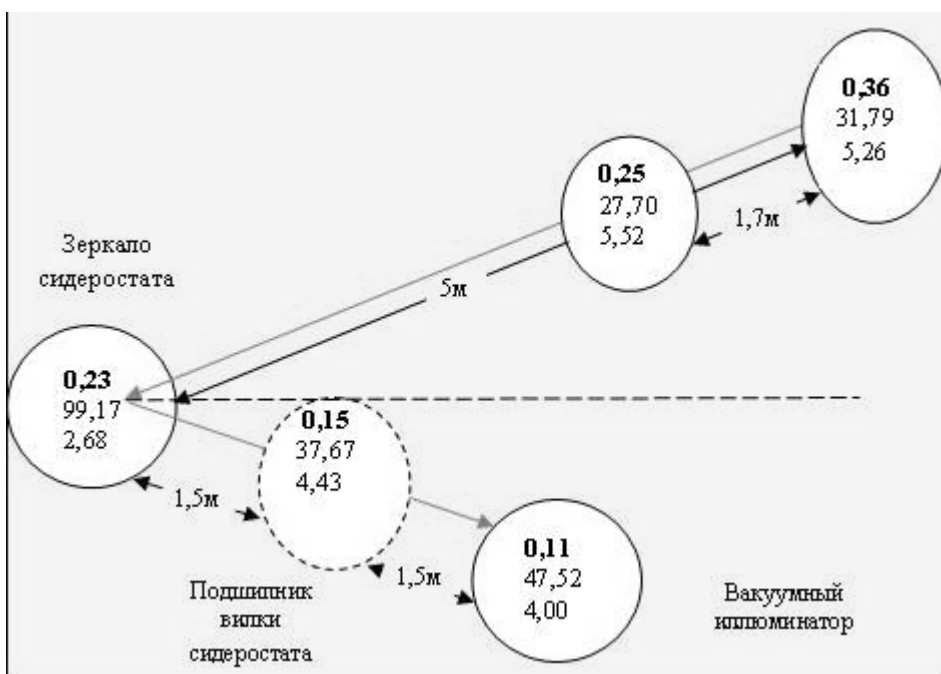


Рис. 4. Изменения значений (соответственно сверху вниз) дисперсии флуктуаций температуры, C_n^2 и r_0 на разных расстояниях от зеркала сидеростата

На расстоянии 5 м от зеркала в юго-восточной оконечности верхней площадки телескопа дисперсия флуктуаций температуры достигает своего максимального наблюдаемого значения вдоль луча зрения $0,36\text{ }^\circ\text{C}$. Далее по ходу луча на верхней части наклонной галереи дисперсия составляет уже меньшее значение и равна $0,25\text{ }^\circ\text{C}$, далее около зеркала образуются флуктуации с дисперсией $0,22\text{ }^\circ\text{C}$, в пространстве полого подшипника привода вилки сидеростата дисперсия флуктуаций снижается до $0,15\text{ }^\circ\text{C}$, а около наружной поверхности вакуумного иллюминатора, который нагревается прямым солнечным пучком и является источником температурных возмущений образуются флуктуации, дисперсия которых составляет только $0,11\text{ }^\circ\text{C}$.

Такая картина наблюдается при восточных или преобладающих западных ветрах. Отсюда можно заключить, что при слабых и умеренных ветрах в обтекающем павильон воздушном потоке при контакте с нагретой поверхностью ветрозащиты увеличиваются температурные неоднородности и воздушный поток, имея большую вертикальную составляющую, выносит их вверх, и они попадают на луч зрения телескопа.

Поскольку дисперсия флуктуаций температуры на верхней площадке определяется также и ее приземными значениями (влиянием турбулентного поля нижней площадки), то важно рассмотреть изменения дисперсии температуры с высотой.

На рис. 5 представлены высотные профили дисперсий флуктуаций температуры, измеренные с трех сторон вертикальной колонны БСВТ: с

севера, востока и запада. Как мы видим, профили в среднем имеют одинаковую тенденцию, а именно – уменьшаются с высотой. Максимальные значения дисперсии наблюдаются в слое до 4 м, что связано с влиянием подстилающей поверхности. Первичный максимум наблюдается на высоте 0,25 м, вторичный – на высоте 4 м. Локальный максимум значения дисперсии на высоте 22 м с западной стороны объясняется влиянием верхней площадки самого телескопа.

Следует отметить, что большие значения дисперсии флуктуаций температуры за счет контакта с подстилающей поверхностью и ветрозащитными стенами вертикальной колонны наблюдаются только в нижнем слое воздуха. На высоте верхней площадки флуктуации уменьшаются до значений 0,1 °С, а на самой площадке снова могут возрасти в зависимости от скорости ветра до значений, наблюдающихся в нижнем слое воздуха. Пока это наблюдательный факт, но можно надеяться, что флуктуации удастся снизить, изменив конструкцию площадки, например, сделав ее решетчатой и продуваемой.

Были проведены измерения структурных характеристик воздушной среды непосредственно внутри павильона, где световые лучи проходят в открытом воздушном пространстве.

На рис. 6 схематично показаны распределения дисперсии температурных флуктуаций внутри зала спектрографа (левый рисунок), в зале оптической адаптивной системы (правый рисунок) и в наблюдательном зале (рисунок в центре).

Во всем зале спектрографа поле дисперсии температуры выровнено, лишь в северо-восточной части зала спектрографа наблюдается небольшой максимум. Источником флуктуаций температуры здесь являются щель и плита спектрографа, которые из-за хорошей теплопроводности имеют температуру смежного помещения.

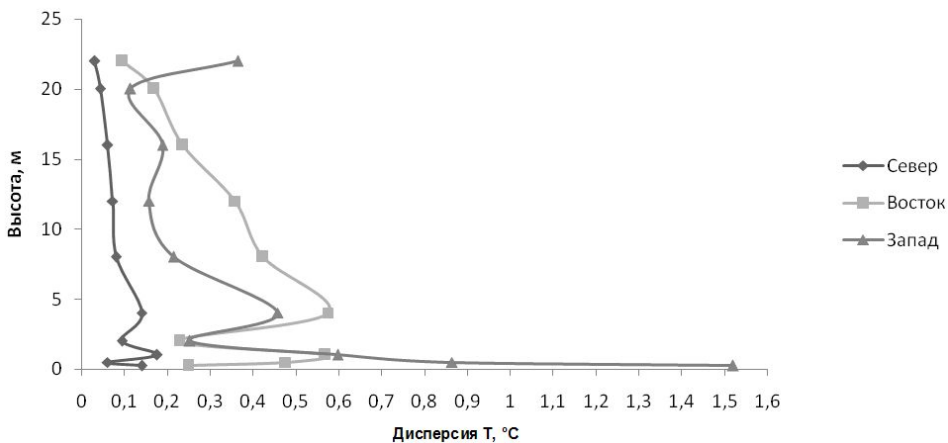


Рис. 5. Изменение дисперсии флуктуаций температуры по высоте

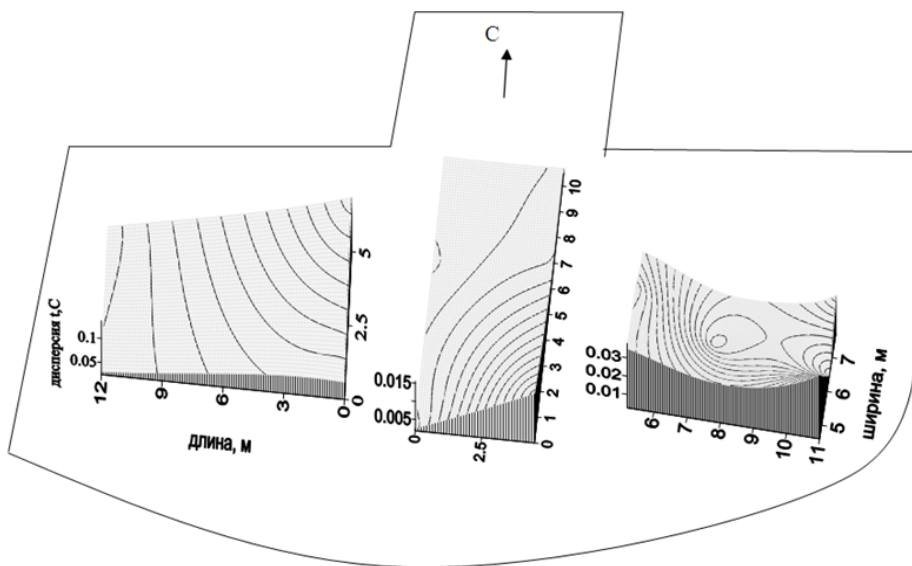


Рис. 6. Распределение дисперсии флуктуаций температуры внутри павильона БСВТ, с запада на восток показаны: зал спектрографа, зал наблюдателя, зал адаптивной оптической системы

Распределение дисперсии температуры в зале с адаптивной оптикой (правый рисунок) характеризуются малыми значениями дисперсии температуры, которые составляют сотые доли $^{\circ}\text{C}$. Однако на отдельных участках оптической схемы из-за нагрева оптических элементов прямым солнечным пучком флуктуации температуры увеличены и могут вносить значительные помехи в определение структуры волнового фронта. Для штатной эксплуатации такие помехи недопустимы и адаптивная система должна быть от них свободна – например, помещена в отдельный блок с разряженным воздухом. В западной части зала с адаптивной оптикой значения дисперсии стремятся к 0, однако на границе со смежным помещением (зал наблюдателя) образуются слабые потоки, которые также вносят помехи в работу адаптивной системы.

В зале наблюдателя значения дисперсия достаточно малы, с небольшим максимумом в его северо-западной части, причиной которого являются особенности архитектуры здания.

Следует отметить, что во всех залах турбулентность, как таковая, выражена слабо, флуктуации температуры возникают из-за разностей медленно движущихся потоков воздуха, порождаемых разностями температуры стенок павильона. Тем не менее, элементы оптической системы, работающие в солнечном пучке, нагреваются и сами становятся источником оптических помех.

Выводы

Площадка вокруг вертикальной колонны телескопа, покрытая белой мраморной крошкой, создает относительно слабые конвективные потоки, которые быстро теряют с высотой интенсивность и на высоте 22 м дисперсия флуктуаций температуры составляет около 0,1. На площадке подкупольного пространства развивается свой пограничный слой, с неравномерно распределенной турбулентностью. В частности, с обогреваемой Солнцем стороны вертикальной колонны флуктуации температуры на уровне верхней (подкупольной) площадки значительно возрастают (до 0,3). Если их ветром выносит на луч зрения телескопа, они снижают качество изображения. Поэтому в разработке мероприятий по повышению качества солнечного изображения на БСВТ необходимо пересмотреть конструкцию всей подкупольной площадки.

Анализ распределения интенсивности турбулентной картины на верхней площадке показал, что наиболее «горячей» точкой является воздух, непосредственно примыкающий к зеркалу сидеростата.

Список литературы

1. *Ахманов С. А.* Физическая оптика / С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин. – М. : Наука, 2004. – 655 с.
2. *Бызова Н. Л.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы / Н. Л. Бызова, В. Н. Иванов, Е. К. Гаргер. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – 264 с.
3. *Казаков Л. Я.* Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере / Л. Я. Казаков, А. Н. Ломакин. – М. : Наука, 1976. – 164 с.
4. *Коваadlo П. Г.* О выборе теплоотражающих покрытий для павильонов Байкальской астрофизической обсерватории. Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца / П. Г. Коваadlo, С. А. Язев. – М. : Наука, 1988. – Вып. 83. – С. 187–192.
5. *Миронов В. Л.* Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере / В. Л. Миронов. – Новосибирск : Наука, 1981. – 248 с.
6. *Татарский В. И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере / В. И. Татарский. – М. : Наука, 1967. – 548 с.
7. *Хромов С. П.* Метеорологический словарь / С. П. Хромов, Л. И. Мамонтов. – СПб. : Гидрометеиздат, 1974. – 564 с.
8. *Fried D. L.* Statistics of geometric representation of wave-front distortion // J. Opt. Soc. Of Am. – 1965. – V. 55. – P. 1427–1435.

Results of Structural Measurements of Parameters of a Ground layer on a Platform of Baikal Astrophysical Observatory ISTP the Siberian Branch of the Russian Academy of Science

P. G. Kovadlo, P. A. Naydenov, A. Y. Shihovzev

Annotation. For the purpose of working out of a technique of calculations of a turbulent mode and optimization of working conditions of large solar telescopes structural measurements of the following parameters of air realized: average values and pulsations of the temperature, a full vector of speed of a wind, and also average relative humidity and pressure of air on a platform of pavilion of the Big solar vacuum telescope (BSVT) the Baikal astrophysical observatory (BAO) ISTP the Siberian Branch of the Russian Academy of Science.

It is shown, that the telescope pavilion promotes formation and development of vertical turbulent streams and increases turbulisation more, than in 2 times. «Hot» sites with raised turbulisation of air along a beam of sight are revealed.

Key words: turbulence, fluctuations of temperature, optical instability of atmosphere.

*Ковадло Павел Гаврилович
доктор физико-математических наук
Иркутский государственный университет
664033, Иркутск, ул. К. Маркса, 1
ведущий научный сотрудник
астрономической обсерватории ИГУ
профессор географического факультета
ИГУ
Институт солнечно-земной физики СО
РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126 а
ведущий научный сотрудник
тел.: (3952) 56-45-78*

*Найденнов Павел Андреевич
студент 4-го курса географического
факультета
Иркутский государственный университет
664033, Иркутск, ул. К. Маркса, 1*

*Шиховцев Артем Юрьевич
студент 4-го курса географического
факультета
Иркутский государственный университет
664033, Иркутск, ул. К. Маркса 1*