

**ОБ АСТРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ  
В ГОРНЫХ РЕГИОНАХ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

<sup>1</sup>А.Ю. Шиховцев, <sup>1</sup>П.Г. Ковадло, <sup>2</sup>Е.А. Копылов

**ON ASTROCLIMATIC CONDITIONS IN MOUNTAIN REGIONS  
OF THE SOUTH OF EASTERN SIBERIA**

<sup>1</sup>A.Yu. Shikhovtsev, <sup>1</sup>P.G. Kovadlo, <sup>2</sup>E.A. Kopylov

Известно, что разрешающая способность телескопов наземного базирования ограничено влиянием атмосферной турбулентности. Повышение разрешающей способности солнечных и звездных телескопов является важной проблемой современной наблюдательной астрономии. В работе представлены результаты исследований астроклиматических условий в месте расположения Саянской солнечной обсерватории (ССО) и Байкальской астрофизической обсерватории (БАО). По данным архива NCEP/NCAR Reanalysis получены вертикальные распределения пульсаций температуры, а также выявлены наиболее выраженные атмосферные слои с высокой турбулизацией. На основе формы энергетического спектра атмосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов для ССО и БАО оценены высотные профили пульсаций показателя преломления воздуха. Информация о характеристиках атмосферной турбулентности важна для классических и мультисопряженных адаптивных оптических систем.

It is known that the resolving power of ground-based telescopes is limited by the influence of atmospheric turbulence. Increasing the resolving power of solar and stellar telescopes is important problem of modern observational astronomy. The results of astroclimatic conditions research at the Sayan Solar Observatory (SSO) site and at the Baikal Astrophysical Observatory (BAO) site are shown in the paper. Vertical distributions of temperature fluctuations are obtained using NCEP / NCAR Reanalysis data as well as atmospheric layers with high turbulization are identified. Using the shape of the energy spectrum of atmospheric turbulence in a wide range of scales allowed us to calculate vertical profiles of the air refractive index fluctuations at the SSO and BAO sites. Information about the atmospheric turbulence characteristics is important for classical adaptive optical systems, as well as for multi-conjugated systems.

**Введение**

При астрономических наблюдениях с помощью телескопов наземного базирования их разрешающая способность ограничена влиянием атмосферной турбулентности. Телескопы наземного базирования, работающие в турбулентной атмосфере, способны разрешить детали, как правило, не лучше 1 угл. сек. В то же время при наблюдениях тонкой структуры необходимо разрешение порядка и лучше 0.1 угл. сек. Знание информации о физической природе образований различных масштабов (в том числе и о тонкой структуре) на Солнце, об условиях их возникновения и эволюции является необходимым для представления модели генерации и диффузии магнитных потоков, для понимания роли движений различных масштабов в порождение и разрушение солнечных пятен. Высокое разрешение, близкое к дифракционному пределу, для наземных солнечных телескопов можно обеспечить, только с помощью применения систем адаптивной оптики (АО). Известно, что классические адаптивные оптические системы в видимом диапазоне могут обеспечивать эффективную коррекцию только в пределах нескольких угловых секунд [Tokovinin, 2000]. Такое поле зрения является недостаточным для наблюдений. В этой связи дальнейшее развитие систем адаптивной оптики – это мультисопряженные адаптивные оптические системы [Beckers, 1989], которые применяются для уменьшения эффекта анизопланатизма атмосферной турбулентности и, таким образом, значительного увеличения корректируемого поля зрения. Концептуальной основой мультисопряженных адаптивных оптических систем является применение нескольких датчиков волнового фронта и деформируемых зеркал, сопряженных с различными турбу-

лентными слоями атмосферы, обеспечивающих трехмерную коррекцию волнового фронта. Однако, определение фазовых возмущений в различных атмосферных слоях является ключевой проблемой для мультисопряженных адаптивных оптических систем. При этом Солнце является идеальной мишенью для МАОС постольку, поскольку обеспечивает множеством «опорных звезд» в любой заданной конфигурации. Форма трехмерного волнового фронта определяется с помощью нескольких датчиков ВФ подобно тому, как это делается в медицинской томографии, где трехмерная структура объекта определяется в результате наблюдений под различными углами. В этой связи оказывается важным знание общей интенсивности и пространственных вариаций атмосферной турбулентности.

Исследования астроклиматических условий в месте расположения Саянской солнечной обсерватории (ССО) и Байкальской астрофизической обсерватории (БАО).

Для определения высот атмосферных слоев с высокой турбулизацией воздуха для ССО и БАО по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis были оценены вертикальные профили значений дисперсии пульсаций температуры воздуха. Дисперсия пульсаций температуры воздуха оценивалась для частот, соответствующих естественному синоптическому периоду (5–7 сут). На рис. 1, а) показаны средние за период с 1984 по 2014 г. вертикальные профили дисперсии пульсаций температуры воздуха для ССО для ночного и дневного времени соответственно. Анализ рис. 2 позволяет говорить о том, что в месте расположения ССО наиболее турбулизированные слои имеют высоты 3 и 12 км. Над уровнем обсерватории (2 км) слои располагаются на 1 и 10 км соот-

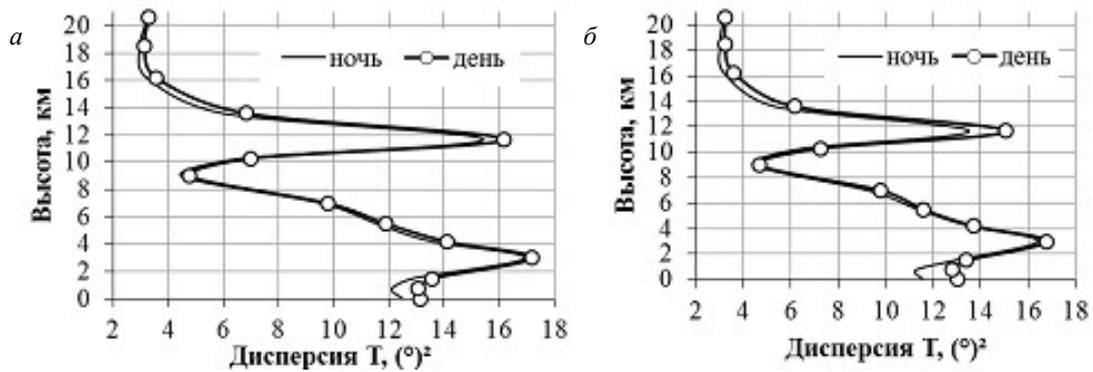


Рис. 1. Средние вертикальные профили дисперсии пульсаций температуры воздуха, оцененные по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis за период с 1984 по 2014 г. для дневного времени; а) – для ССО, б) – для БАО.

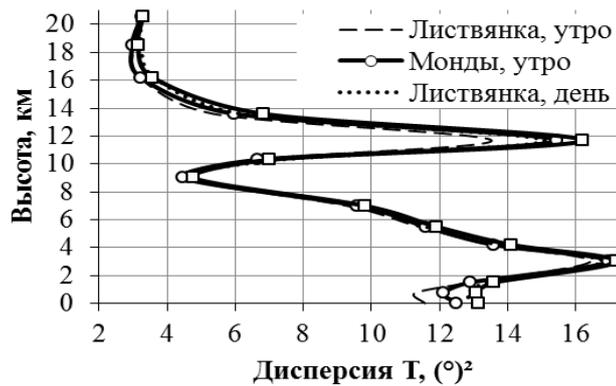


Рис. 2. Средние вертикальные профили дисперсии пульсаций температуры воздуха для БАО и ССО по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis за период с 1984 по 2014 г. для дневного времени.

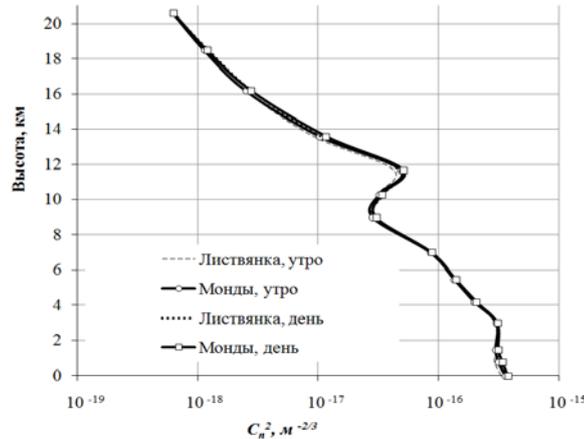


Рис. 3. Средние вертикальные профили структурной характеристики пульсаций показателя преломления воздуха в месте расположения БАО и ССО по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis за период с 1984 по 2014 г.

ответственно. В дневное время интенсивность пульсаций температуры становится выше по сравнению с ночью. Для сравнения также были проанализированы вертикальные профили дисперсии температуры, показанные на рис. 1, б). Дисперсия пульсаций температуры оценивалась по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis на каждом доступном изобарическом уровне в месте расположения БАО за тот же период наблюдений. В месте расположения БАО наиболее турбулизированные слои также располагаются на высотах 3 и 12 км. С учетом высоты расположения БАО эти слои соответствуют высотам – около 2.5 км и 11.5 км.

Сравнения ночного и дневного профилей показывает, что дневная турбулентность также оказывается более интенсивной. Сравнение астропунктов БАО и ССО показывает следующее (рис. 3). В месте расположения БАО складываются более благоприятные астроклиматические условия по сравнению с ССО. Наибольшие отличия дисперсии пульсаций температуры по величине наблюдаются в атмосферном пограничном слое и в слое на уровне 200 гПа и достигают 10–14 %.

Используя методику оценки мелкомасштабных характеристик турбулентности [Ковадло, 2012], основанную на спектральных особенностях атмосфер-

ной турбулентности в широком диапазоне масштабов, по ассимилированным в узлы сетки данным архива NCEP/NCAR Reanalysis, оценены значения структурной характеристики пульсаций показателя преломления воздуха для различных изобарических уровней в месте расположения ССО и БАО. На рис. 3 показаны расчетные вертикальные профили структурной характеристики пульсаций показателя преломления воздуха, основанные на данных радиозондовых наблюдений ассимилированных в узлы сетки. Вертикальные профили получены за период с 1984 по 2014 г.

Используя полученные профили структурной характеристики пульсаций показателя преломления воздуха можно оценить радиус атмосферной когерентности  $r_0$ . Величина  $r_0$  определяется степенью развитости турбулентных течений и высотным профилем структурной характеристики пульсаций показателя преломления воздуха  $C_n^2(z)$ :

$$r_0 = \left( 0.423k^2 \sec^3 \alpha \int_0^H C_n^2(z) dz \right)^{-\frac{3}{5}}, \text{ где } k = \frac{2\pi}{\lambda} - \text{волновое число, } \alpha - \text{зенитный угол наблюдения, } z - \text{высота уровня, } H - \text{максимальная высота оптически активной атмосферы, } \lambda - \text{длина волны света. Среднее значения радиуса атмосферной когерентности для ССО составляет 4.4 см, для БАО - 4.6 см соответственно.}$$

По результатам экспериментальных исследований, выполненных в месте расположения БАО, средние значения радиуса атмосферной когерентности находятся в пределах от 1.5 до 5.5 см. В месте расположения ССО по данным приложения к бюллетеню «Солнечные данные», «Магнитные поля солнечных пятен» радиус атмосферной когерентности при дневной турбулентности оценивается порядка 4.5 см. В выходящем два раза в месяц приложении, публиковались данные о дрожании в угловых секундах и о качестве изображения – в пятибалльной шкале.

Таким образом, в месте расположения ССО наиболее турбулизированные атмосферные слои располагаются на высотах порядка 1 км и 10 км, а в месте расположения БАО – около 2.5 км и 11.5 км над уровнем обсерватории соответственно. Средние значения радиуса атмосферной когерентности, оцененные из методики, основанной на спектральных особенностях атмосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов, для ССО – 4.4 см, для БАО – 4.6 см. Полученный радиус атмосферной когерентности близок к наблюдаемому или оцененным значениям из других методик. Представленные результаты позволяют выбрать уровни для мультисопреженных адаптивных оптических систем, а также оценить параметры классических АОС. Например, минимальное число актюаторов деформируемого

зеркала  $N_{акт} = 0.24 \left( \frac{D}{r_0} \right)^2$  окажется равным порядка

70 для Большого солнечного вакуумного телескопа БАО (диаметр телескопа  $D=76$  см), и порядка 1150 для планируемого трехметрового солнечного телескопа в месте расположения ССО.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю., Кочеткова О.С. Методика оценки оптической нестабильности земной атмосферы на основе численного анализа сетевых метеорологических данных. Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2012. № 2. С. 139–149.

Beckers J.M. Detailed compensation of atmospheric seeing using multiconjugate adaptive optics // Proc. of SPIE. 1989. V. 1114. P. 215–217.

Tokovinin A., Louarn M., Sarazin M. Isoplanatism in a multiconjugate adaptive optics system // J. Opt. Soc. Am. A. 2000. V. 17, N 10. P. 1819–1827.

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск Россия