
О СТАТИСТИКЕ АСТРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В САЯНСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

ASTROCLIMATIC STATISTICS AT THE SAYAN SOLAR OBSERVATORY

А.Ю. Шиховцев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, artempochta2009@rambler.ru*

П.Г. Ковадло

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kovadlo2006@rambler.ru*

А.В. Киселев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kiselev@iszf.irk.ru*

A.Yu. Shikhovtsev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, artempochta2009@rambler.ru*

P.G. Kovadlo

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kovadlo2006@rambler.ru*

A.V. Kiselev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kiselev@iszf.irk.ru*

Аннотация. В работе приводится анализ метеорологических и оптических характеристик атмосферы в месте расположения Саянской солнечной обсерватории (ССО) и будущего Крупного солнечного телескопа с диаметром зеркала 3 м (КСТ-3). Рассматриваются пространственные особенности изменений астроклиматических характеристик для ССО и Байкальской астрофизической обсерватории (БАО). Получен вертикальный профиль структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха для низкой интенсивности оптической суммарной турбулентности по лучу зрения. Получение профиля является важным результатом, поскольку даст возможность подстроить систему адаптивной оптики КСТ-3 под лучшие астроклиматические условия, когда эффективность коррекции максимальна. С точки зрения анализа вертикальных профилей характеристик оптической турбулентности, включая оценку вклада отдельных слоев атмосферы в величину изопланатического угла при минимальном уровне суммарной турбулентности, даются рекомендации для построения мультисопряженной адаптивной оптики в целом и, в частности, для КСТ-3.

Ключевые слова: астроклимат, адаптивная оптика.

Abstract. The paper analyzes meteorological and optical characteristics of the atmosphere at the Sayan Solar Observatory (SSO) and the future 3 m Large Solar Telescope (LST-3). We examine spatial features of changes in astroclimatic characteristics for the Sayan Solar Observatory and Baikal Astrophysical Observatory (BAO). We have obtained a vertical profile of the structural characteristic of air refractive index fluctuations for a low intensity optical turbulence along the line of sight. This profile is an important result because it will allow us to adjust the adaptive optics system of LST-3 to the best astroclimatic conditions when the correction efficiency is maximal. In order to analyze vertical profiles of optical turbulence characteristics and to assess the contribution of individual atmospheric layers to the isoplanatic angle for a minimum level of total turbulence, we give recommendations for the design of multi-conjugated adaptive optics in general and for LST-3 in particular.

Keywords: astroclimate, adaptive optics.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире и в России создается ряд крупных и очень крупных (по сравнению с орбитальными) наземных телескопов, а также разрабатываются новые проекты. При реализации планов строительства и модификации крупных телескопов высокого разрешения для достижения максимальной эффективности их работы актуальным является их месторасположение. Оптимальным следует считать такое место, где природные помехи или их совокупность, отрицательно влияющие на режимы работы телескопа и снижающие его потенциальные возможности, минимальны.

Известно, что место для астрономической обсерватории определенного профиля выбирается с учетом избранных астроклиматических характеристик [Носов и др., 2010; Панчук, Афанасьев, 2011]. С одной

стороны, эффективность работы наземного астрономического телескопа определяется продолжительностью ясного неба в течение года. Видимость слабых объектов с помощью астрономических телескопов и контраст изображений ограничены прозрачностью атмосферы и рассеянием света, включая яркость фона ночного неба. Для получения высокого разрешения в длиннофокусных системах и наблюдения мельчайших деталей изображения основным фактором становится статистика качества изображений (определяемых как seeing или через радиус Фрида). Причем радиус Фрида существенно изменяется как на коротких временных промежутках, так и на длинных климатических интервалах. Среди других важнейших макроклиматических характеристик можно выделить ветровой режим и облачный покров. Часто место для строительства круп-

Описание наиболее часто используемых архивов NCEP/NCAR Reanalysis, ERA-40 и ERA Interium

Архив	Используемое пространственное разрешение по горизонтали, град	Уровни, гПа	Период наблюдений
Ncep/Ncar Reanalysis	2.5	1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10	1948–2019 гг.
Era-40	0.125	1000, 925, 850, 775, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20	1957–2002 гг.
Era-Interium	0.125	1000, 975, 950, 925, 900, 875, 850, 825, 800, 775, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 225, 200, 175, 150, 125, 100, 70, 50, 30, 20, 10, 7, 5, 3, 2, 1	1979–2019 гг.

ных телескопов выбирается по фрагментарным результатам астроклиматических исследований.

Мониторинг и оценки астроклиматических характеристик представляют интерес не только на этапе выбора места для строительства крупного телескопа, но и непосредственно в пункте расположения строящегося или действующего астрономического инструмента. С одной стороны, длительные наблюдения дают возможность получения достаточно длинных временных рядов, которые могут быть использованы при оценке астроклиматических характеристик. С другой стороны, наблюдения астропогодного режима, включая оптическую турбулентность, могут способствовать развитию концепций формирования турбулентности на разных высотах и ее влияния на структуру оптического излучения от космических источников света.

С целью перехода на новый уровень экспериментальных исследований в области солнечно-земной физики разработан проект Национального геофизического комплекса РАН [Жеребцов, 2013]. В настоящей работе исследуются астроклиматические характеристики в ССО, которые могут быть использованы при оптимизации адаптивной оптики будущего КСТ-3 и построении мультисопряженной адаптивной системы.

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ИЗОБАРИЧЕСКОМ УРОВНЕ 200 гПа

Одной из важнейших астроклиматических характеристик, анализируемой во многих астрономических обсерваториях мира и описывающей скорость изменения турбулентности в оптически активном слое атмосферы, является скорость воздушного потока в верхней тропосфере в зоне струйного течения [Bounhir et al., 2009; Chueca et al., 2004; García-Lorenzo et al., 2009; Nash et al., 2011]. Показано, что для ССО и БАО индикатором изменений оптической турбулентности может являться скорость воздушного потока на изобарической поверхности 200 гПа V_{200} на высоте ~12 км [Bolbasova et al., 2019].

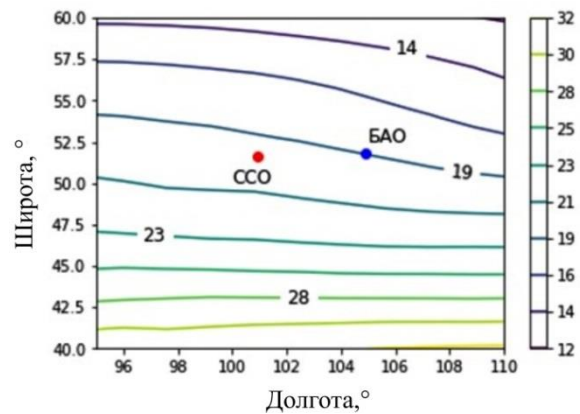


Рис. 1. Усредненное за год распределение скорости воздушного потока V_{200} в ССО, полученное по данным архива Era-Interium. Горизонтальное разрешение 35° N – 65° N, 90° E – 115° E

Для анализа скорости воздушного потока на уровне 200 гПа в ССО был использован архив ERA Interium [https://www.ecmwf.int/en]. По сравнению с наиболее известными базами данных, такими как NCEP/NCAR Reanalysis и ERA-40, архив ERA Interium основан на системе ассимиляции данных 4D-Var и содержит большее количество высотных уровней как в атмосферном пограничном слое (АПС), так и в свободной атмосфере, с высоким разрешением по горизонтали. В таблице приведено описание наиболее часто используемых архивов NCEP/NCAR Reanalysis, ERA-40 и ERA Interium.

По данным архива ERA Interium с пространственным разрешением 0.125° по горизонтали было получено усредненное за год распределение V_{200} в ССО, показанное на рис. 1.

По оси абсцисс отложены долготы, по оси ординат — широты, приведены изолинии V_{200} , показаны положения ССО и БАО. Примечательно, что анализ пространственного распределения V_{200} позволяет говорить о широтной зависимости ее изменений и уменьшении средних значений с увеличением широты. Для ССО среднее значение $V_{200} = 19.7$ м/с.

Sarazin M. [Sarazin et al., 2001] предложил концепцию, согласно которой максимум в вертикальном профиле V_{200} связан со скоростью горизонтального переноса турбулентных флукуаций V_0 следующим образом [García-Lorenzo et al., 2009]:

$$V_0 = kV_{200}, \quad (1)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от положения обсерватории и принимающий типичные для средних широт значения от 0.4 до 0.6. С учетом среднего диапазона разброса k для ССО $V_0 = 7.9 \div 11.8$ м/с.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СКОРОСТИ ПОТОКА В ПРЕДЕЛАХ АПС ДЛЯ САЯНСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Помимо горизонтальной составляющей V_{200} , еще одной важной характеристикой является вертикальная составляющая скорости ветра, которая связана с плавучестью и статической устойчивостью атмосферы. Эту величину важно рассматривать в АПС, вносящим наибольший вклад в оптическую турбулентность по лучу зрения при одинаковых толщинах атмосферных слоев. Качество астрономических изображений во многом определяется как величиной вертикальных воздушных потоков, так и их пространственной изменчивостью.

На рис. 2 показано пространственное распределение вертикальной составляющей скорости ветра в БАО и ССО в пределах АПС.

Анализ пространственного распределения позволяет говорить о том, что обсерватории находятся в условиях неоднородного поля вертикальной составляющей скорости воздушного потока. При этом ССО преимущественно находится на периферии области с восходящими движениями в АПС. Это может приводить к формированию дополнительной турбулентности, связанной с восходящими движениями. Рисунок 2 дает основание считать, что БАО находится под воздействием области устойчивых нисходящих потоков в АПС, которые обычно приводят к подавлению турбулентности.

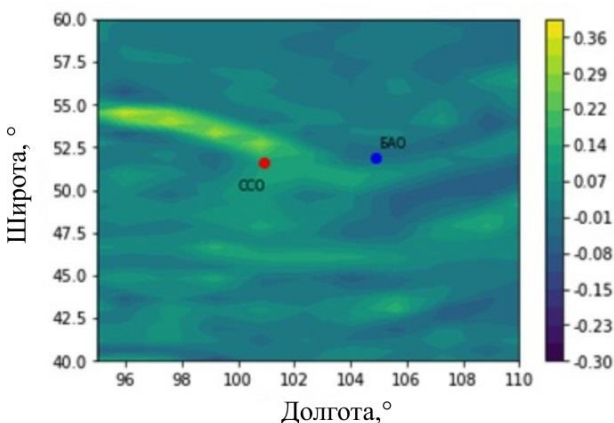


Рис. 2. Усредненное за год пространственное распределение вертикальной составляющей скорости ветра в БАО и ССО. Распределение получено по данным архива Era-Interium. Горизонтальное разрешение 0.25°

ОБЛАЧНОСТЬ В САЯНСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Анализ облачности представляет интерес не только с точки зрения доступной продолжительности наблюдательного времени на наземных астрономических телескопах, но также с точки зрения воздействия аэрозоля на формирование облачности и ее влияния на радиационный баланс выбранного пункта. Например, как показано в работе [Кабанов и др., 2019], в межгодовой изменчивости общей аэрозольной оптической толщи атмосферы в районе Томска отмечен значимый отрицательный тренд грубодисперсной компоненты. Уменьшение общей аэрозольной оптической толщи атмосферы может являться индикатором уменьшения облачности над Западной и Восточной Сибирью.

По данным архива Era-Interium с горизонтальным разрешением 0.125° было получено среднее годовое распределение нормированной доли общей облачности W в районе ССО и БАО (рис. 3). Нормированные доли общей облачности W определялись согласно соотношению

$$W = W_{\text{изм}} / W_{\text{макс}}, \quad (2)$$

где $W_{\text{изм}}$ — расчетное среднее годовое значение доли общей облачности в каждом узле сетки; $W_{\text{макс}}$ — максимальное среднее годовое значение доли общей облачности в выбранном районе. Анализ распределения W показывает, что доля общей облачности убывает с севера на юг.

При анализе астроклиматических условий интерес представляет также внутригодовая изменчивость общей облачности над ССО. Возрастая в отдельные месяцы и убывая в другие, изменения общей облачности могут свидетельствовать о сезонности дифференциального вклада в радиационный баланс. На рис. 4 показаны внутригодовые изменения повторяемости общей облачности для ССО по данным архива Era-Interium за разные годы.

Повторяемость общей облачности существенно изменяется в течение года. В ее внутригодовых изменениях часто можно заметить три максимума,

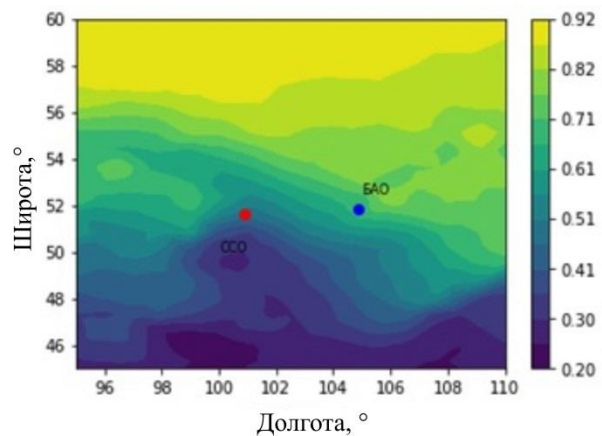


Рис. 3. Среднее годовое распределение нормированной доли общей облачности W для ССО с 2008 по 2018 г., полученное по данным архива Era-Interium. Горизонтальное разрешение 0.125° , выбранный район для интерполяции ограничен $40^\circ \text{ N} - 65^\circ \text{ N}$, $90^\circ \text{ E} - 115^\circ \text{ E}$

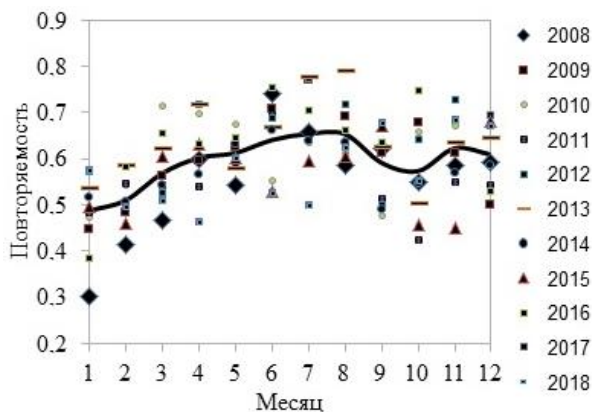


Рис. 4. Внутригодовые изменения повторяемости общей облачности для ССО по данным архива Era-Interium за разные годы. Повторяемость общей облачности приведена в безразмерных единицах

приходящиеся на апрель, июль–август, ноябрь. При этом наименьшая доля наблюдается в январе и сентябре–октябре, в отдельные месяцы она может составлять около 0.3–0.4.

Для сравнения характера изменений общей облачности на рис. 5 приведен годовой ход повторяемости ясных дней по общей облачности, определенный по справочным данным. Центральный максимум в общей облачности (3–7 баллов) приходится на летний период наблюдений. Как среднее число полных ясных дней, так и среднее число дней с общей облачностью до 2 баллов включительно, в летний период имеют минимум. В году среднее число ясных дней по общей облачности достигает 29, по нижней облачности — существенно больше (до 188) с минимумом в летние месяцы. Годовой ход числа ночей с туманами, также ограничивающими наблюдения, показан на рис. 6. Видно, что повышенная повторяемость туманов наблюдается в летний период, когда качество изображений наилучшее.

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ НАБЛЮДАТЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА АСТРОПЛОЩАДКЕ САЯНСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Важнейшей астроклиматической характеристикой является возможная продолжительность наблюдательного времени (в часах). Для астроплощадки ССО в качестве характеристики продолжительности наблюдений была выбрана метеорологическая продолжительность солнечного сияния. По справочным данным она была рассчитана для разных месяцев. Годовой ход продолжительности солнечного сияния для астроплощадки ССО показан на рис. 7.

Средние значения продолжительности солнечного сияния получены непосредственно путем подсчета за периоды наблюдений с 1956 по 1980 г. и с 2000 по 2004 г. Анализ рис. 7 показывает, что продолжительность солнечного сияния существенно изменяется в течение года. Наибольшие значения наблюдаются в летний период. Суммарно продолжительность солнечного сияния для ССО принимает значения 2299 ч/год за 1956–1980 гг. и 2472 ч/год за 2000–2004 гг.

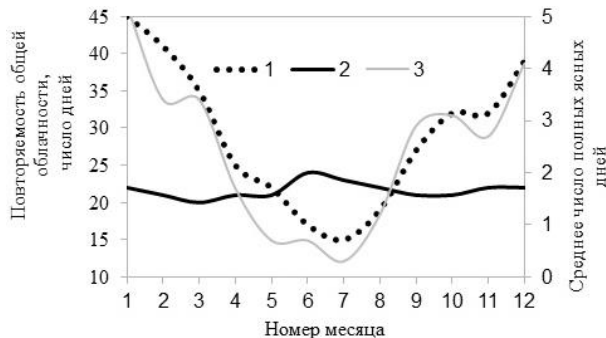


Рис. 5. Годовой ход повторяемости ясных дней по общей облачности: 1 — повторяемость общей облачности 0–2 балла; 2 — повторяемость общей облачности 3–7 баллов, 3 — среднее число полных ясных дней (вспомогательная ось ординат) для астроплощадки ССО

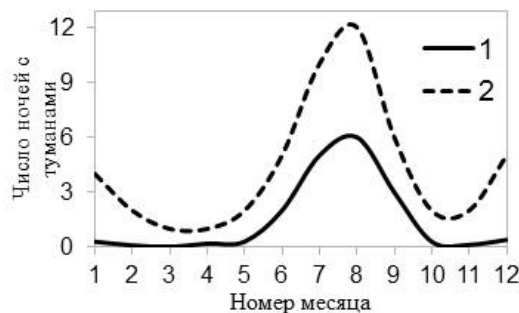


Рис. 6. Годовой ход числа ночей с туманами: 1 — среднее число ночей с туманами; 2 — наибольшее число ночей с туманами на астроплощадке ССО

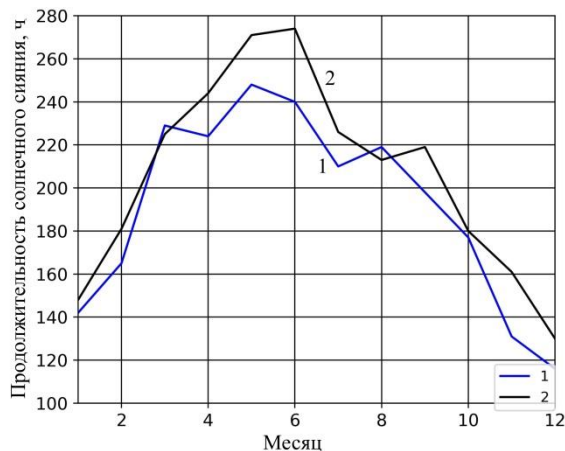


Рис. 7. Годовой ход продолжительности солнечного сияния: 1 — средняя продолжительность солнечного сияния с 1956 по 1980 г.; 2 — средняя продолжительность солнечного сияния с 2000 по 2004 г., рассчитанная для астроплощадки ССО

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Одной из важнейших характеристик оптической атмосферной турбулентности, знание вертикального профиля которой необходимо для проектирования и оптимизации классических адаптивных оптических систем (АОС) коррекции астрономических изображений и мультисопряженной оптики, является структурная характеристика турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха.

Современные АОС способны корректировать изображения только для условий слабой атмосферной турбулентности по лучу зрения. В этой связи для классических и мультисопряженных АОС необходима информация о вертикальном профиле структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха до высот порядка 20 км при достаточно высоком исходном качестве изображения.

С использованием спектрального метода оценки средних энергетических характеристик турбулентности на разных высотах в атмосфере [Shikhovtsev, Kovadlo, 2018; Shikhovtsev et al., 2019] для малых значений дисперсий флуктуаций температуры воздуха в низкочастотной области энергетического спектра были рассчитаны значения структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха $C_n^2(z)$ согласно соотношению

$$C_n^2(z) = \left(\frac{AP(z)}{\langle T \rangle^2(z)} \right)^2 \times E(f_L, z) \exp \left(-3 \left(\ln \frac{f_i}{f_L} + \ln \frac{f_m}{f_{iL}} \right) - \frac{5}{3} \left(\ln \frac{f_i}{f_m} \right) \right) \times \frac{1}{0.125} f_i^{5/3}, \quad (3)$$

где A — постоянный множитель; P — атмосферное давление на данной высоте z ; $\langle T \rangle$ — средняя температура воздуха на данном высотном уровне; $E(f_L, z)$ — расчетное значение спектральной плотности флуктуаций (дисперсии) температуры воздуха в низкочастотной области в энергетическом спектре турбулентности; f_i — частота изменения наклона спектра от -3 до $-5/3$ в низкочастотном диапазоне; f_{iL}, f_m — частоты в переходной области микрометеорологического диапазона по их возрастанию; f_i — наибольшая частота в спектре. Важно, что в первом приближении экспоненту, содержащую спектральные частоты, можно рассматривать как некоторый маломеняющийся для данной обсерватории коэффициент. В этом случае $C_n^2(z)$ будет определяться вертикальными профилями средней температуры воздуха, атмосферного давления и характеристиками дисперсии температуры воздуха в низкочастотном спектральном пике, связанном с механизмом баро-клинической неустойчивости.

С использованием данных архива Ncep/Ncar Reanalysis за 1988–2018 гг. были рассчитана дисперсия температуры воздуха на разных высотах в низкочастотной спектральной области и профиль структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха $C_n^2(z)$ по формуле (3). На рис. 8 показаны зависимости структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха от высоты слоя (линия 1) и величины J_t , дающей наибольший вклад в мерцание и изопланатический угол атмосферной толщи в ССО (линия 2). Величина J_t получена как

$$J_t = \int_{z_1}^{z_2} C_n^2(z) z^{5/3} dz, \quad (4)$$

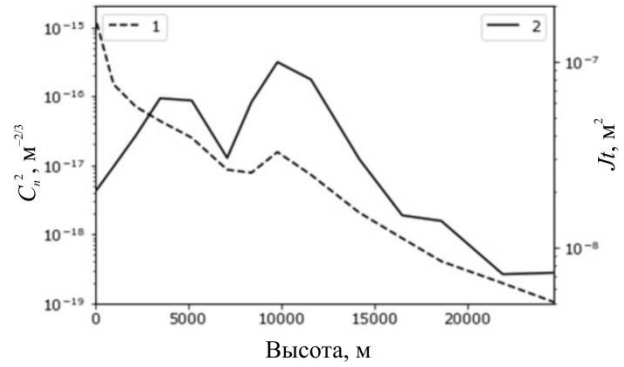


Рис. 8. Зависимости структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха от высоты слоя (линия 1) и величины J_t , дающей наибольший вклад в мерцание и изопланатический угол атмосферной толщи в ССО (линия 2)

где уровни z_1 и z_2 определяются вертикальным решением данных архива Ncep/Ncar Reanalysis.

Анализ изменений величины J_t позволяет говорить о том, что при создании мультисопряженной АОС для солнечного телескопа необходимо ориентироваться на систему, сопряженную с двумя вынесенными плоскостями, — на атмосферные слои с высотами около 3–5 и 10–12 км.

Согласно теории распространения световых волн в атмосфере, в приближении малых возмущений и для близких к вертикальным оптическим трассам индекс мерцания связан с вертикальным профилем структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха следующим образом:

$$\sigma_I^2 = 2.24k^{7/6} \int_0^H C_n^2(z) z^{5/6} dz. \quad (5)$$

Величина σ_I^2 изменяется в зависимости от спектрального состава турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха, а также от вида источника (Солнце слабо мерцает из-за пространственного усреднения по изображению).

Величина структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха пропорциональна не только флуктуациям интенсивности распространяющейся световой волны в атмосфере, которые обычно связывают с атмосферными неоднородностями на высоте ~ 10 км над подстилающей поверхностью (считается, что этот атмосферный слой вносит наибольший вклад во флуктуации амплитуды). Она также пропорциональна изопланатическому углу, который для оптических трасс, близких к вертикальным, может быть определен по формуле

$$\theta_0 = \left(2.91k^2 \int_0^H C_n^2(z) z^{5/3} dz \right)^{-3/5}. \quad (6)$$

Используя величину f_b , определенную по всей толще атмосферы, получим, что для вертикального профиля $C_n^2(z)$ изопланатический угол $\theta_0 = 1.86$ угл. сек, при этом на длине волны 0.5 мкм радиус Фрида составляет 8.4 см. Используя расчетный вертикальный профиль структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха для этого радиуса, получим, что индекс мерцания точечного

источника равен 0.21 (формула (5)). Здесь стоит заметить, что приближение малых возмущений хорошо выполняется для $\sigma_I^2 < 0.3$. Известно также, что индекс мерцания может составлять 0.01–1 для звезд (точечного источника), а для Солнца — протяженного источника — он существенно уменьшается до значений $\sim 10^{-6}$ – 10^{-8} . В этом смысле оцененная величина индекса по профилю (см. рис. 8) находится в диапазоне изменений значений для точечного источника.

По данным измерений датчика Шака—Гартмана Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) помимо локальных наклонов волнового фронта рассчитаны также распределения интенсивности в субапертурах. Для оценки мерцания без усредняющего действия источника света должно выполняться соотношение [Татарский, 1967]

$$\gamma L < \sqrt{\lambda L}, \quad (7)$$

где γ — угловое расстояние между двумя крайними лучами от объекта; L — длина пути луча. Можно считать, что в измерениях, выполненных на БСВТ, γL : $\sqrt{\lambda L}$ (в пределах субапертуры произведение расстояния между двумя крайними лучами $\gamma=4$ угл. сек и расстоянием до слоя L оказывается $\gamma L \sim 0.39$ м, а $\sqrt{\lambda L}$: 0.1 м). С этой точки зрения можно полагать, что при наблюдениях достаточно компактных солнечных объектов возможна оценка индекса мерцания. При этом ослабление мерцания изображений хотя и происходит, но существенно меньше, чем при полной апертуре.

Используя в подынтегральном выражении в (6) вместо z эффективную высоту $z=h_{ef}$, для видимого диапазона можно получить грубую оценку изопланатического угла

$$\theta_0 : K_I (\sigma_I^2)^{-3/5}, \quad (8)$$

где K_I — коэффициент пропорциональности [Sarazin, Tokovinin, 2001].

На рис. 9 показаны изменения от кадра к кадру нормированной суммарной по полю интенсивности разных участков края солнечного изображения на двух разнесенных субапертурах датчика волнового фронта в плоскости зрачка БСВТ.

Для приведенных субапертур дисперсия нормированной суммарной по полю зрения интенсивности изменяется в пределах $7.5 \cdot 10^{-6}$ – $1.4 \cdot 10^{-5}$ (приведенное значение дисперсии интенсивности на 1 пиксель составляет $\sim 10^{-8}$). В этом случае коэффициент пропорциональности в (8) отличается от K_I для точечных изображений.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Детальная характеристика атмосферной турбулентности, ветра и других астроклиматических параметров по-прежнему имеет решающее значение для оптимизации будущих астрономических инструментов с развивающимся направлением адаптивной оптики, в том числе для оптического мульти-

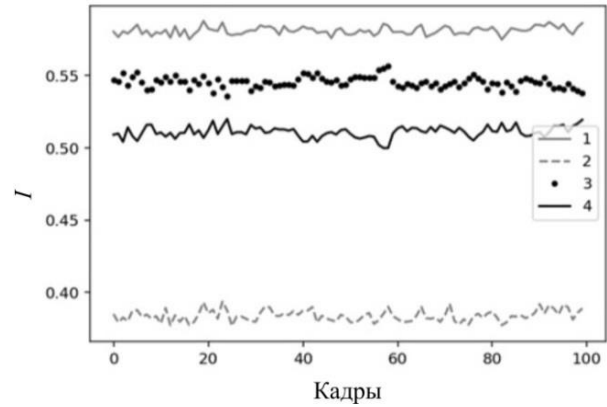


Рис. 9. Изменения от кадра к кадру нормированной суммарной по полю интенсивности разных участков края солнечного изображения на двух разнесенных субапертурах датчика волнового фронта в плоскости зрачка БСВТ: 1 — верхний участок края солнечного изображения, опорная субапертура; 2 — нижний участок края солнечного изображения, опорная субапертура; 3 — верхний участок края солнечного изображения, разнесенная субапертура; 4 — нижний участок края солнечного изображения, разнесенная субапертура

сопряжения. Полученные пространственные распределения горизонтальной составляющей скорости воздушного потока на изобарической поверхности 200 гПа, вертикальной составляющей скорости потока в пределах АПС и облачности свидетельствуют о высокой степени пространственной изменчивости. Изменения амплитуд скоростей особенно выражены в горной местности — в ССО. Получено, что для ССО среднее годовое значение горизонтальной составляющей V_{200} составляет 19.7 м/с. С учетом среднего разброса коэффициента пропорциональности k ожидаемое значение турбулентной скорости V_0 составит от 7.9 до 11.8 м/с. Полученные характерные значения V_0 согласуются с расчетами этой величины для астрономической обсерватории Тейде [García-Lorenzo et al., 2009], для которой V_0 может достигать ~ 18 м/с, а ее характерные значения изменяются от 3.8 до 8.2 м/с.

Проанализирована метеорологическая обстановка и получен вертикальный профиль структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха для условий слабой интегральной турбулентности по лучу зрения в ССО. На основе полученного вертикального профиля для длины волны 0.5 мкм выполнены оценки изопланатического угла и индекса мерцания. Показано, что индекс мерцания для вертикального профиля структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха для радиуса Фрида 8.4 см может быть описан в рамках теории распространения световых волн в турбулентной атмосфере в приближении слабых возмущений. Наблюдения мерцания солнечных изображений на БСВТ показывают, что для оценок характеристик оптической турбулентности по флуктуациям амплитуды требуются дальнейшие исследования по уточнению значений подынтегральной функции и коэффициента пропорциональности K_I .

Полученные результаты могут служить основой оценок потенциального времени работы телескопа,

а также создания мультисопряженной АОС для произвольного солнечного телескопа. В частности, для КСТ-3 необходимо ориентироваться на адаптивную мультисистему, сопряженную с двумя вынесенными плоскостями, удаленными на расстояния около 3–5 и 10–12 км. Оценки положения атмосферных слоев и их влияния на оптические искажения, возникающие в турбулентной атмосфере, могут служить основой проектирования АОС, работающих в широком поле зрения [Шиховцев и др., 2019].

Исследования выполнены преимущественно при финансовой поддержке РФФ 19-79-00061. Измерения выполнены частично с использованием уникальной научной установки «Большой солнечный вакуумный телескоп» [<http://ckp-rf.ru/usu/200615>] в рамках программы ФНИ И.16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Жеребцов Г.А. Национальный гелиогеофизический комплекс РАН // Всероссийская конференция по солнечно-земной физике, посвященная 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В.Е. Степанова: Тезисы докладов. 2013. С. 4.

Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С. Межгодовая и сезонная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы в районе Томска (1995–2018 гг.) // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 7. С. 548–555.

Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г. и др. Рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1099–1110.

Панчук В.Е., Афанасьев В.Л. Астроклимат Северного Кавказа — мифы и реальность // Астрофизический бюллетень. 2011. Т. 66, № 2. С. 253–274.

Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.

Шиховцев А.Ю., Ковадло П.Г., Лукин В.П. и др. Разработка системы адаптивной оптики для крупного астрономического телескопа с контуром определения искажений на разных высотах // Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия – 2019»: Тезисы. 2019. С. 116.

Bolbasova L., Shikhovtsev A.Yu., Kopylov E.A., et al. Daytime optical turbulence and wind speed distributions at the Baikal Astrophysical Observatory // *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 2019. V. 482. P. 2619–2626. DOI: [10.1093/mnras/sty2706](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2706).

Bounhir A., Benkhaldoun Z., Carrasco E., Sarazin M. High-altitude wind velocity at Oukaimeden observatory // *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 2009. V. 398, iss. 2. P. 862–872. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.14998.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14998.x).

Chueca S., García-Lorenzo B., Muñoz-Tuñón C., Fuensalida J.J. Statistics and analysis of high-altitude wind above the Canary Islands observatories // *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 2004. V. 349. P. 627–631. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.07523.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07523.x).

García-Lorenzo B., Eff-Darwich A., Fuensalida J.J., et al. Adaptive optics parameters connection to wind speed at the Teide Observatory // *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 2009. V. 397. P. 1633–1646. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.15071.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15071.x).

Hash Y., Jabiri A., Ziad A., et al. Meteorological profiles and optical turbulence in the free atmosphere with NCEP/NCAR data at Oukaimeden – I. Meteorological parameters analysis and tropospheric wind regimes // *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 2011. V. 420, iss. 1. P. 637–650. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.20076.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.20076.x).

Sarazin M., Tokovinin A. The statistics of isoplanatic angle and adaptive optics time constant derived from DIMM data // Proc. Topical Meeting “Beyond conventional adaptive optics:

a conference devoted to the development of adaptive optics for extremely large telescopes”. Venice, Italy. 2001.

Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G. Estimation of mean energy characteristics of atmospheric turbulence at various heights from reanalysis data // *IOP*. 2018. V. 211. P. 7. DOI: [10.1088/1755-1315/211/1/012023](https://doi.org/10.1088/1755-1315/211/1/012023).

Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G., Lukin V.P. Temporal variations of the turbulence profiles at the Sayan solar observatory site // *Atmosphere*. 2019. V. 10, N 9. P. 499. DOI: [10.3390/atmos10090499](https://doi.org/10.3390/atmos10090499).

URL: <http://ckp-rf.ru/usu/200615> (дата обращения 20 августа 2019 г.).

URL: <https://www.ecmwf.int/en> (дата обращения 20 августа 2019 г.).

REFERENCES

Bolbasova L., Shikhovtsev A.Yu., Kopylov E.A., Selin A.A., Lukin V.P., Kovadlo P.G. Daytime optical turbulence and wind speed distributions at the Baikal Astrophysical Observatory. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 2019, vol. 482, pp. 2619–2626. DOI: [10.1093/mnras/sty2706](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2706).

Bounhir A., Benkhaldoun Z., Carrasco E., Sarazin M. High-altitude wind velocity at Oukaimeden observatory. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 2009, vol. 398, iss. 2, pp. 862–872. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.14998.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14998.x).

Chueca S., García-Lorenzo B., Muñoz-Tuñón C., Fuensalida J.J. Statistics and analysis of high-altitude wind above the Canary Islands observatories. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 2004, vol. 349, pp. 627–631. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.07523.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07523.x).

García-Lorenzo B., Eff-Darwich A., Fuensalida J.J., Castro-Almázán J. Adaptive optics parameters connection to wind speed at the Teide Observatory. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 2009, vol. 397, iss. 3, pp. 1633–1646. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.15071.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15071.x).

Hash Y., Jabiri A., Ziad A., Bounhir A., Sabil M., Abahamid A., Benkhaldoun Z. Meteorological profiles and optical turbulence in the free atmosphere with NCEP/NCAR data at Oukaimeden – I. Meteorological parameters analysis and tropospheric wind regimes. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 2011, vol. 420, iss. 1, pp. 637–650. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.20076.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.20076.x).

Kabanov D.M., Sakerin S.M., Turchinovich Yu.S. Interannual and seasonal variations in the atmospheric aerosol optical depth near Tomsk (1995–2018). *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2019, vol. 32, iss. 7, pp. 548–555. (In Russian).

Nosov V.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Recommendations for the site selections of the ground-based astronomical telescopes. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2010, vol. 23, iss. 12, pp. 1099–1110. (In Russian).

Panchuk V.E., Afanas'ev V.L. Astroclimate of Northern Caucasus — myths and reality. *Astrofizicheskiy byulleten'* [*Astrophys. Bull.*]. 2011, vol. 66, no. 2, pp. 233–254. DOI: [10.1134/S199034131102009X](https://doi.org/10.1134/S199034131102009X).

Sarazin M., Tokovinin A. The statistics of isoplanatic angle and adaptive optics time constant derived from DIMM data. Proc. Topical Meeting “Beyond conventional adaptive optics: a conference devoted to the development of adaptive optics for extremely large telescopes”. Venice, Italy. 2001.

Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G. Estimation of mean energy characteristics of atmospheric turbulence at various heights from reanalysis data. *IOP*. 2018, vol. 211, p. 7. DOI: [10.1088/1755-1315/211/1/012023](https://doi.org/10.1088/1755-1315/211/1/012023).

Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G., Lukin V.P. Temporal variations of the turbulence profiles at the Sayan Solar Observatory site. *Atmosphere*. 2019, vol. 10, no. 9, p. 499. DOI: [10.3390/atmos10090499](https://doi.org/10.3390/atmos10090499).

Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Kiselev A.V., Kolobov D.Yu. Design of the adaptive optics system with

estimating the optical distortions at the different altitudes for large astronomical telescope. *Vserossiiskaya konferentsiya "Sovremennaya zvyozdnaya astronomiya – 2019"* [Russian National Conference "Modern stellar astronomy – 2019"]: Abstracts. 2019, p.116. (In Russian).

Tatarsky V.I. Wave propagation in the turbulent atmosphere. Moscow, *Nauka Publ.*, 1967, 548 p. (In Russian).

Zherebtsov G.A. SB RAS National Heliogeophysical complex. *Vserossiiskaya konferentsiya po solnechno-zemnoi fizike, posvyashchennaya 100-letiyu so dnya rozhdeniya chlenakorrespondenta RAN V.E. Stepanova* [The National Russian Conference on Solar-Terrestrial Physics Devoted to the

Hundredth Anniversary of Corresponding Member of RAS V.E. Stepanov]: Abstracts. 2013, p. 4. (In Russian).

URL: <http://ckp-rf.ru/usu/200615> (accessed 20 August 2019).

URL: <https://www.ecmwf.int/en> (accessed 20 August 2019).

Как цитировать эту статью

Шиховцев А.Ю., Ковadlo П.Г., Киселев А.В. О статистике астроклиматических характеристик в районе расположения Саянской солнечной обсерватории. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 1. С. 126–133. DOI: [10.12737/szf-61202012](https://doi.org/10.12737/szf-61202012).