

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 520.16

Развитие модели турбулентной атмосферы на астроплощадке Большого солнечного вакуумного телескопа в приложении к адаптации изображений

П.Г. Ковадло¹, В.П. Лукин², А.Ю. Шиховцев^{1*}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 26.12.2017 г.

Работа направлена на уточнение расчетной модели характеристик турбулентной атмосферы на астроплощадке Большого солнечного вакуумного телескопа с привлечением анализа энергетического спектра в широком диапазоне частот и деформаций вертикального профиля структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха в пограничном слое атмосферы (до 1 км) в зависимости от энергии приземной турбулентности.

Ключевые слова: турбулентность, эффективная скорость турбулентных течений, эффективная высота турбулентности; turbulence, effective turbulence velocity, effective turbulence height.

Введение

Для развития методов и устройств адаптивной оптики в астрономии необходима информация о мелкомасштабной структуре турбулентности на разных высотах «оптически активной» атмосферы. Оценки пространственного распределения амплитудных и динамических характеристик турбулентности важны прежде всего для оптимизации систем адаптивной оптики (АО), корректирующих искажения волнового фронта в широком поле зрения. Примером таких устройств могут служить мультисистемы АО с несколькими деформируемыми зеркалами, сопряженными с апертурой телескопа и заданными высотными уровнями, удаленными от нее, или системы АО, которые корректируют оптические помехи приземного слоя несколькими датчиками волнового фронта (англ. GLAO). Развитие техники стабилизации и коррекции изображений в широком поле зрения на основе учета локальных особенностей турбулентности по лучу зрения телескопа — это направление, носящее во многом экспериментальный характер, в рамках которого возможно получать высококачественные данные не только об отдельных солнечных образованиях небольших пространственных масштабов, но и анализировать их комплексно.

Работа выполнена с целью дальнейшего развития модели турбулентности атмосферы на астроплощадке Большого солнечного вакуумного теле-

скопа (БСВТ) в части согласования изменений структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха с высотой с учетом локальных амплитудных особенностей турбулентности в пограничном слое.

Модель турбулентной атмосферы на астроплощадке БСВТ и обсуждение результатов расчета

Для описания воздействия турбулентности на оптическое излучение в задачах оптики атмосферы часто используют величину структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха. При прочих равных условиях эта величина практически полностью определяется структурной характеристикой флуктуаций температуры воздуха и отражает интенсивность «оптической» турбулентности.

Известно, что реальные атмосферные течения, особенно вблизи подстилающей поверхности, не являются однородными и изотропными. Несмотря на это атмосферная турбулентность в наиболее мелкомасштабном диапазоне для статистического ансамбля состояний достаточно хорошо описывается теорией Колмогорова—Обухова. В рамках этой теории спектральная плотность турбулентных флуктуаций температуры воздуха E_l зависит от частоты в степени $-5/3$ в диапазоне $1/L_0 \gg f_s \gg 1/l$ [1]:

$$E_l(f_s) = 0,125 C_T^2 f_s^{-5/3}, \quad (1)$$

где l — внутренний масштаб турбулентности; L_0 — внешний масштаб турбулентности; C_T^2 — структурная

* Павел Гаврилович Ковадло (kovadlo2006@rambler.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Артем Юрьевич Шиховцев (artempochta@gmail.com).

характеристика флуктуаций температуры воздуха; f_{ls} — пространственная частота в мелкомасштабном спектральном диапазоне.

В то же время атмосферные течения охватывают более широкий интервал пространственных масштабов: от крупных атмосферных образований, где реализуется механизм бароклинной неустойчивости, и мезомасштабных неоднородностей до микрометеорологических турбулентных течений, включая «энергетический» диапазон и интервал мелкомасштабной турбулентности, как правило, ассоциирующийся с колмогоровской турбулентностью. Говоря о крупномасштабном диапазоне, лежащем в спектре значительно левее микрометеорологического интервала, необходимо иметь в виду, что речь идет не столько о турбулентных течениях, сколько о вихревом и струйном характере атмосферных течений.

Таким образом, для описания спектра турбулентных течений в широком диапазоне пространственных масштабов, включая мелкомасштабный, «энергетический» и наиболее крупномасштабные мезо- и макродиапазоны, нужно привлекать спектральные модели многомасштабных турбулентных течений.

Разрабатываемая нами модель основана на форме энергетического спектра турбулентных течений в широком диапазоне пространственных и временных масштабов: от макромасштабных течений (с размерами от 600 до 3000 км и временем жизни от нескольких часов до 5–7 сут) до мелкомасштабной турбулентности. Промежуток времени продолжительностью 5–7 сут был определен Б.П. Мультиановским [2] как естественный синоптический период, в течение которого сохраняется такое термобарическое поле в тропосфере, которое обуславливает определенную ориентировку перемещения барических образований у поверхности Земли и сохранение общей картины расположения их центров на пространстве так называемого естественного синоптического района. Данные наблюдений и численного моделирования атмосферных течений показывают, что форма энергетических спектров анализируемых турбулентных течений, рассчитанных за длительные периоды времени, устойчива [3]. При понижении или увеличении общей энергии турбулентных течений энергетический спектр турбулентности в широком диапазоне пространственных и временных масштабов, хотя и деформируется, в целом сохраняет свою форму.

Так, анализ деформаций форм спектров турбулентности [4–6] позволяет предположить, что крупномасштабные вихри и неоднородности структурированы по энергетике мелкомасштабной турбулентности. В формировании энергетического спектра как мелко-, так и крупномасштабной атмосферной турбулентности ключевая роль принадлежит общей энергии турбулентных течений, охватывающих широкий диапазон пространственных и временных масштабов. Основываясь на этом условии, энергетика мелкомасштабной турбулентности может быть оценена по амплитуде колебаний в наиболее низкочастотной (макромасштабной) области спектра.

Как показывают данные наблюдений за структурой воздушных течений в свободной атмосфере [5],

пространственный энергетический спектр флуктуаций температуры воздуха может быть аппроксимирован двумя зависимостями: $E(f) \sim f^{-3}$ — в наиболее низкочастотном пространственном диапазоне и $E(f) \sim f^{-5/3}$ — в мезомасштабном и высокочастотном диапазонах. С учетом формы энергетического спектра турбулентности в широком пространственно-временном диапазоне спектральная плотность турбулентных флуктуаций температуры воздуха в высокочастотной части $E_t(f)$ для свободной атмосферы может быть параметризована на основе расчета амплитуды спектра в области самых низких частот $E(f_0)$:

$$E_t(f_t) = E(f_L) \exp \left\{ -3 \left(\ln \frac{f_t}{f_L} \right) - \frac{5}{3} \left(\ln \frac{f_t}{f_L} \right)^2 \right\}, \quad (2)$$

где f_L — пространственная частота в низкочастотном диапазоне; f_t — пространственная частота в высокочастотном диапазоне; f_t — пространственная частота переходной области спектра (от -3 к $-5/3$). В выражении (2) спектральная плотность флуктуаций $E_t(f_t)$ имеет размерность $(\text{°})^2 \text{ м}$. Переходная область, где зависимость спектральной плотности флуктуаций температуры воздуха изменяется от f^{-3} до $f^{-5/3}$, соответствует пространственному диапазону от 800 до 600 км (что по экспериментальным данным [3] соответствует эквивалентным временным частотам от 10^{-5} до $1,5 \cdot 10^{-5}$ Гц при разной средней скорости ветра). В исследованиях формы энергетических спектров часто приходится иметь дело с временными рядами данных. С этой точки зрения, здесь и далее приводятся как пространственные, так и временные частоты.

Данные архива реанализа, например NCEP/NCAR Reanalysis (<https://www.esrl.noaa.gov>), используемого в дальнейшем при расчетах, содержат ассимилированные в узлы регулярной сетки данные о температуре воздуха, трех составляющих скорости ветра и др. на 17 изобарических поверхностях от 1000 до 10 гПа. Значения составляющих скорости ветра и температуры воздуха на каждой изобарической поверхности (высоте) доступны с временным разрешением 6 ч, которое позволяет определить низкочастотные значения дисперсии температуры воздуха по временным рядам продолжительностью 5 сут. Стоит заметить, что при определении энергетических характеристик во временном интервале, ограниченном средней максимальной продолжительностью естественного синоптического периода (7 сут), требуется учет более пологого, чем -3 , наклона энергетического спектра в диапазоне от 5 до 7 сут. Для оценки соответствия времени, равного 5 сут, пространственному масштабу использовалась гипотеза замороженной турбулентности с коэффициентом переноса крупномасштабных вихрей $K = 0,7$ [7]:

$$f_L = 0,7 f_T / \bar{V}, \quad (3)$$

$f_T = 0,2 \text{ сут}^{-1}$. Рассчитанные значения дисперсии температуры воздуха σ_T^2 по временным и пространственным частотам эквивалентны

$$\sigma_T^2 = \int_{f_0}^{f_T} E(f) df = \int_{f_m}^{f_l} E(f) df. \quad (4)$$

Здесь временная частота $f_T = 0,1 \text{ сут}^{-1}$, а f_m – пространственная частота, соответствующая одним суткам.

Таким образом, зная зависимости спектральной плотности флуктуаций температуры воздуха от частоты в широком диапазоне пространственных масштабов, по значениям спектральной плотности в низкочастотном диапазоне спектра, рассчитанным по архивным радиозондовым данным реанализа, можно оценить структурную характеристику флуктуаций температуры воздуха в свободной атмосфере.

Подставляя в (1) выражение (2) с учетом зависимости (3), а также допуская, что в свободной атмосфере $f_l = f_{ls}$, можно получить

$$C_T^2 = \frac{E(f_L) \exp\left\{-3\left(\ln \frac{f_t}{f_L}\right) - \frac{5}{3}\left(\ln \frac{f_l}{f_t}\right)\right\}}{0,125} f_l^{5/3}. \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет оценить структурную характеристику флуктуаций показателя преломления воздуха на разных высотах в свободной атмосфере.

Переход от наклона спектра -3 к наклону $-5/3$ происходит на масштабе 800 км, что соответствует $f_t \sim 10^{-5}$ Гц. Исходя из того, что выражение (1) справедливо лишь в диапазоне $1/L_0 \gg f_{ls} \gg 1/l$, искомую спектральную плотность флуктуаций температуры оценим для $f_l = 1$ м, при этом временные частоты при наблюдаемых скоростях ветра окажутся выше 1 Гц.

Имея в виду, что $f_L = 0,7f_T/\bar{V}$, спектральная плотность флуктуаций температуры воздуха в узкой полосе частот определяется выражением

$$E(f_L) = \sigma_T^2(f_L)/f_L, \quad (6)$$

где $\sigma_T^2(f_L)$ – дисперсия температуры воздуха на частоте f_L .

Для оценки спектральной плотности флуктуаций в узкой полосе частот по дисперсии температуры воздуха, определенной за промежуток времени 5 сут, воспользуемся соотношением

$$E(f_L) = \sigma_T^2(f_L)/(f_L) = a(f_t)\sigma_T^2(\tau)/(f_L), \quad (7)$$

где $a(f_t, \bar{V})$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от масштаба перехода от наклона спектра -3 к наклону $-5/3$ и средней скорости ветра.

С учетом распределения энергии в соответствии с формой спектра на низких частотах коэффициент пропорциональности изменяется от 0,3 до 0,5, и при $f_L = 2,3 \cdot 10^{-6}$ и $f_t \sim 10^{-5}$ Гц $a(f_t, \bar{V})$ его можно принять равным 0,3 [3].

Были рассчитаны характерные значения дисперсии температуры воздуха $\sigma_T^2(\tau)$ на уровне $P = 500$ гПа (5 км) в месте расположения БСВТ, среднее значение за период с 2000 по 2016 г. составляет $9,5$ ($^\circ$)². Используя среднее рассчитанное

значение $9,5$ ($^\circ$)² и $f_t = 1,4 \cdot 10^{-5}$ Гц, получим, что $C_T^2 \approx 3,4 \cdot 10^{-4}$ ($^\circ$)² · м^{-2/3}, а $C_n^2 = \left(AP/\bar{T}^2\right)^2 C_T^2 \approx 1,45 \cdot 10^{-16}$ м^{-2/3}.

Структура мелкомасштабных турбулентных течений в атмосферном пограничном слое может существенно отличаться от турбулентности вышележащей свободной атмосферы за счет волновых процессов в устойчиво-стратифицированных атмосферных слоях, взаимодействия крупномасштабных течений и структур с нижними слоями и подстилающей поверхностью, квазипериодических вихрей, возникающих при обтекании сложного рельефа. В высокочастотной части энергетического спектра турбулентности, соответствующего атмосферному пограничному слою, образуется «ступенька», где спектральная плотность флуктуаций зависит от частоты в степени, изменяющейся от $-5/3$ до $+2$ [3]. С этой точки зрения, формула (5) должна быть уточнена при расчете в пограничном слое атмосферы.

Применение метода расчета турбулентных параметров, основанного на учете формы энергетического спектра турбулентности с использованием выражения (5), позволило определить вертикальные профили структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха в месте расположения БСВТ. Результат аппроксимаций среднего вертикального профиля $C_n^2(z)$ для дневных условий может быть представлен в виде [3]:

$$C_n^2(z) = C_n^2(z_0) \cdot \exp(-z/2000) + C_{n1}^2 \cdot \exp(-z/6000) + C_{n2}^2 \cdot \exp(-(z - z_c)/h_c)^2.$$

Здесь z – высота; $C_n^2(z_0)$ – приземное значение структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха; C_{n1}^2 – значение структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха в точке минимума под атмосферным турбулентным слоем (в данном случае на высоте 9 км); C_{n2}^2 – наибольшее значение структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха в атмосферном турбулентном слое; z_c – высота расположения атмосферного слоя; h_c – толщина атмосферного слоя. В месте расположения БСВТ рассчитанные спектральным методом фоновые значения $C_n^2(z_0) = 1,4 \cdot 10^{-15}$ м^{-2/3}; $C_{n1}^2 \approx C_n^2(z_0)/114 \approx 1,22 \cdot 10^{-17}$ м^{-2/3}; $C_{n2}^2 \approx C_n^2(z_0)/27 \approx 4 \cdot 10^{-17}$ м^{-2/3}; $z_c = 11500$ м; $h_c = 1000$ м.

Полученные профили дали возможность оценить и сравнить с экспериментальными данными величину радиуса Фрида [5], широко применяемую в задачах оптики атмосферы для описания фазовых и амплитудных флуктуаций оптического излучения.

По экспериментальным данным оценка радиуса Фрида проводилась по локальным наклонам волнового фронта на субапертурах, разнесенных в плоскости, сопряженной со зрачком телескопа. Сравнение экспериментальных и модельных значений радиуса Фрида показало разницу, в ряде случаев составляющую несколько сантиметров на длине волны 0,5 мкм. Наибольшие отклонения расчетных от

измеренных значений радиуса Фрида наблюдаются в условиях интенсивной приземной турбулентности. Результаты экспериментов доказывают, что турбулентность в приземном слое атмосферы оказывает определяющее влияние на профиль $C_n^2(z)$ вплоть до высот порядка нескольких километров. Для построения согласующейся модели изменений структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха с высотой, характерной для астроплощадки БСВТ, деформации профиля $C_n^2(z)$ в пограничном слое в зависимости от энергии приземной турбулентности были учтены согласно экспериментальным моделям, описанным в работе [1].

На рис. 1 показан пример временных изменений радиуса Фрида по данным синхронных оптических и микрометеорологических измерений в условиях интенсивной приземной турбулентности, когда отклонения значений друг от друга были максимальны. Временные изменения радиуса Фрида, оцененные по данным измерений локальных наклонов волнового фронта датчиком Шака–Гартмана, показаны сплошной кривой, по данным микрометеорологических измерений турбулентных характеристик в приземном слое (АМК-03) – пунктирной. Значения радиуса Фрида, рассчитанные с учетом зависимости $C_n^2(z) \sim z^{-4/3}$ в пограничном слое, показаны сплошной кривой с точками.

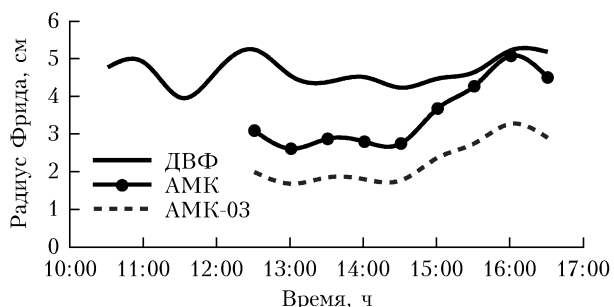


Рис. 1. Пример временных изменений радиуса Фрида, оцененных из синхронных оптических и микрометеорологических измерений на БСВТ в условиях интенсивной приземной турбулентности 17.02.2017 г.

Для оценки условий качества «астрономического видения» в течении суток анализировались данные непрерывных мачтовых измерений турбулентных флуктуаций скорости ветра и температуры воздуха на высоте 30 м с 19.07 по 16.08.2016 г. Структурная характеристика флуктуаций показателя преломления воздуха рассчитывалась за 3-минутный промежуток, шаг между измерениями 20 мин. С учетом деформаций вертикального профиля структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха в пограничном слое атмосферы (до 1 км) в зависимости от энергии приземной турбулентности были оценены значения радиуса Фрида на длине волны 0,5 мкм. Суточный ход радиуса Фрида, приведенного к зениту, характерный для астроплощадки БСВТ, показан на рис. 2. Вертикальными отрезками обозначены стандартные отклонения радиуса Фрида.

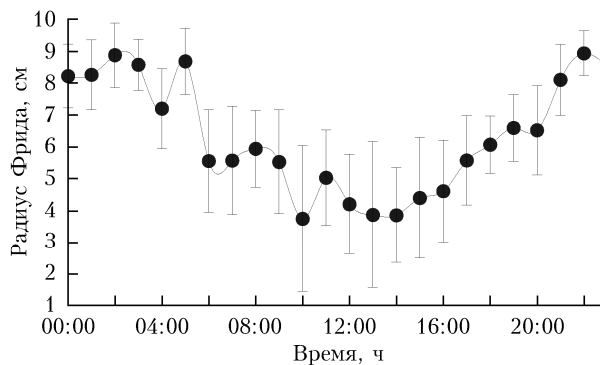


Рис. 2. Суточный ход радиуса Фрида, приведенного к зениту, характерный для астроплощадки БСВТ. Восстановлен по «точечным» измерениям

Как показывает анализ рис. 2, для изменений радиуса Фрида характерен суточный ход с наибольшими значениями в ночные часы; приведенные к зениту средние значения могут достигать 9 см. При высоте Солнца над горизонтом 58° , близкой к максимальной за рассматриваемый период наблюдений, значения радиуса Фрида для наклонной трассы могут оказаться существенно меньше приведенных. В дневное время за счет развития турбулентности в атмосферном пограничном слое радиус Фрида уменьшается до 4 см. Из астрономической практики известно, что в 14:00 по местному времени в месте расположения БСВТ можно ожидать улучшения качества астрономического видения. Отсутствие максимума в 14:00 в суточном ходе радиуса Фрида можно объяснить наличием сильных ветров в период наблюдений. Интенсивный внешний воздушный поток при обтекании телескопа является причиной вынужденной конвекции и подавления стабилизирующего влияния на воздушную среду большой акватории оз. Байкал.

Полученные профили $C_n^2(z)$ позволяют оценить еще одну величину, применяемую в моделировании оптической турбулентности, – эффективную высоту турбулентного слоя

$$H_{\text{eff}} = \left(\frac{\int_0^H C_n^2(z) z^{3/5} dz}{\int_0^H C_n^2(z) dz} \right)^{3/5},$$

которая выступает критерием применимости модели параметризации мелкомасштабных характеристик через скорость ветра на уровне 200 гПа (около 12 км) [8] к конкретному пункту. Данные наблюдений показывают, что связь между эффективной скоростью турбулентных течений и скоростью ветра на изобарическом уровне 200 гПа имеет место, если эффективная высота турбулентного слоя больше или равна 3 км [9]. Рассчитанная для разных сезонов года в месте расположения БСВТ $H_{\text{eff}} = 2020$ м в зимний период и 2540 м в летний. Увеличение эффективной высоты турбулентного слоя в летний период связано с понижением интенсивности турбулентности не только в приземном слое атмосферы, но и во всем рассматриваемом диапазоне до высот ~ 20 км.

Помимо структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха, радиуса Фрида и эффективной высоты турбулентного слоя, для оценки оптимальных параметров адаптивной оптики [10, 11] важной величиной является эффективная скорость турбулентных течений V_{eff} , рассчитываемая как отношение интеграла от произведения структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха и скорости воздушного потока к интегральной интенсивности турбулентности [9]:

$$V_{\text{eff}} = \left(\frac{\int_0^H C_n^2(z) V^{5/3}(z) dz}{\int_0^H C_n^2(z) dz} \right)^{3/5}.$$

В расчетах использовались вертикальные профили структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха и скорости воздушного потока, полученные по архивным радиозондовым данным реанализа.

На рис. 3 показаны расчетные вариации V_{eff} с 1948 по 2016 г. в зимний и летний периоды.

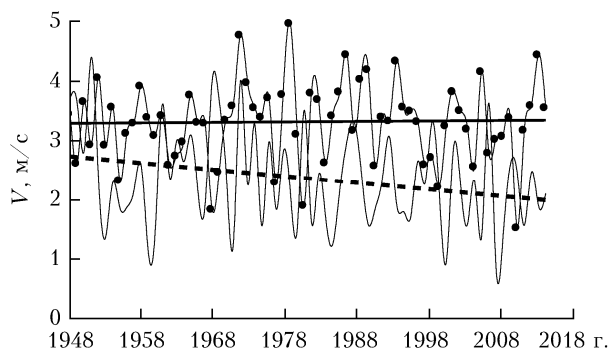


Рис. 3. Рассчитанные вариации эффективной скорости турбулентных течений с 1948 по 2016 г. в зимний (кривая с точками) и летний периоды (сплошная кривая) и соответствующие тренды (сплошная и пунктирная прямые)

Анализ изменений эффективной скорости турбулентных течений в точке стояния БСВТ позволяет говорить о том, что в зимний период значения эффективной скорости практически не менялись и составляли около 3,4 м/с. В летний период 1948–2016 гг. наблюдалось уменьшение V_{eff} примерно от 2,8 до 2 м/с. Таким образом, условия астрономических наблюдений в месте расположения БСВТ улучшаются. В частности, это позволяет снизить требования к динамическому диапазону адаптивных систем.

Заключение

Показано, что учет деформаций вертикального профиля структурной характеристики флуктуаций

показателя преломления воздуха в пограничном слое атмосферы (до 1 км) в зависимости от энергии приземной турбулентности позволяет уточнить оценку структурных характеристик для развитой турбулентности. Эффективная скорость турбулентных течений в зимний период составляет 3,4 м/с, а в летний снижается до 2 м/с. При характерных значениях r_0 от 3 до 6 см эффективная высота турбулентного слоя в месте расположения БСВТ составляет 2020 м в зимний период и 2540 м — в летний.

Часть результатов получена с использованием Большого солнечного вакуумного телескопа (<http://skr-rf.ru/usu/200615/>). Анализ структурных особенностей оптической турбулентности выполнен при поддержке РФФИ (проект № 18-35-00033).

Оптические и акустические измерения выполнены при финансовой поддержке РНФ (грант № 17-79-20077).

1. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
2. Мультиановский Б.П. Основные положения синоптического метода долгосрочных прогнозов погоды. М.: ЦУЕГМС, 1933. 139 с.
3. Шиховцев А.Ю. Исследование оптической неустойчивости земной атмосферы и условий коррекции солнечных изображений: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Иркутск: Институт солнечно-земной физики СО РАН, 2016. 23 с.
4. Kellerer A., Tokovinin A. Atmospheric coherence time in interferometry: Definition and measurement // Astron. Astrophys. 2006. V. 461, N 2. P. 775–781.
5. Kovadlo P.G., Shikhovtsev A.Yu. Optical turbulence and different parameters of airflow // Proc. SPIE. 2014. V. 9292. P. 6.
6. Sarazin M., Tokovinin A. The statistics of isoplanatic angle and adaptive optics time constant derived from DIMM data // Beyond Conventional Adaptive Optics. A Conference Devoted to the Development of Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes. Venice, Italy. 2001. P. 321–328.
7. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 712 с.
8. Nastrom G.D., Gage K.S. A climatology of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft // J. Atmos. Sci. 1985. V. 42, N 9. P. 950–960.
9. Fried D.L. Statistics of geometric representation of wavefront distortion // J. Opt. Soc. Am. 1965. V. 55. P. 1427–1435.
10. Garcia-Lorenzo B., Eff-Darwich A., Fuensalida J.J., Castro-Almazan J. Adaptive optics parameters connection to wind speed at the Teide Observatory // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2009. V. 397. P. 1633–1646.
11. Tung K.K., Orlando W.W. The k^{-3} and $k^{-5/3}$ energy spectrum of atmospheric turbulence: Quasigeostrophic two-level model simulation // J. Atmos. Sci. 2003. V. 60. P. 824–835.

P.G. Kovadlo, V.P. Lukin, A.Yu. Shikhovtsev. The development of the model of turbulent atmosphere on the astroplatform of Large Solar Vacuum Telescope as applied to image adaptation.

The work is aimed at the improvement of the model of turbulent atmosphere at the Large Solar Vacuum Telescope site using the analysis of the energy turbulence spectrum in a wide range of frequencies and deformations of the vertical profile of the structure characteristic of the air refraction index in the atmospheric boundary layer (up to 1 km) depending on the surface turbulence energy.