

ОПТИКА СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

УДК 520.16, 551.55

**Статистика сезонных изменений
вертикального распределения скорости ветра
над Байкальской астрофизической обсерваторией**

Л.А. Больбасова^{1,2}, В.П. Лукин¹, П.Г. Ковадло³, А.Ю. Шиховцев^{3*}

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

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

³*Институт солнечно-земной физики СО РАН
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а*

Поступила в редакцию 28.01.2019 г.

Исследуются сезонные изменения высотного распределения скорости ветра в районе оз. Байкал для Байкальской астрофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН в связи с задачей разработки адаптивной оптической системы Большого солнечного вакуумного телескопа. Проанализированы данные реанализа NCEP/NCAR с 1948 по 2016 г. Рассчитаны средние и медианные значения, первый и третий квартили профилей скорости ветра до высоты 32,5 км для каждого месяца. Восстановлен сезонный ход высоты тропопаузы. Предложена модель профиля скорости ветра, особенностью которой является учет скорости ветра на уровне 200 гПа как астроклиматического показателя качества изображений.

Ключевые слова: астроклимат, скорость ветра, адаптивная оптика; astroclimate, wind speed, adaptive optics.

Введение

Знание вертикального распределения скорости ветра является важным для создания эффективных адаптивных оптических систем астрономических телескопов. Градиент скорости ветра способствует формированию турбулентности в атмосфере, а приземный ветер может приводить к вибрациям конструкции телескопа и, как следствие, к дрожанию изображения. Высотный профиль скорости ветра определяет требования к рабочей полосе частот адаптивных оптических систем через такие параметры, как время когерентности или частота Гринвуда [1]. На сегодняшний день большое внимание уделяется разработке методов прогностической адаптивной оптической коррекции атмосферных флуктуаций с использованием информации о скорости ветра для компенсации временной задержки систем адаптивной оптики [2, 3].

Архивные данные реанализов применяются в исследованиях высотного распределения скорости ветра во всех крупных зарубежных астрономических обсерваториях [4–14]. В [8, 9] было предложено использовать значение скорости ветра на уровне 200 гПа (V200) в качестве параметра для оценки применимости систем адаптивной оптики. Корреляция

этой величины с астрономическим качеством изображения была установлена также с использованием данных архивов реанализов для ряда крупных астрономических обсерваторий [8–14].

В настоящей работе представлены результаты исследования сезонных изменений высотного распределения скорости ветра, включая V200, по данным реанализа NCEP/NCAR над Байкальской астрофизической обсерваторией (БАО) Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН. Эти исследования имеют непосредственное прикладное значение в связи с задачей разработки адаптивной оптической системы для Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) с размером апертуры 1 м, являющегося главным инструментом БАО.

Материалы и методы исследования

В работе использовались доступные данные архива базы реанализа NCEP/NCAR. Это совместный проект NCEP (National Centers for Environmental Prediction – Национальный метеорологический центр США) и NCAR (National Center for Atmospheric Research – Национальный центр США исследования атмосферы), обозначенный как Reanalysis Project – «Повторный анализ», по созданию архивов глобальных атмосферных полей в поддержку потребностей в исследовании и текущего контроля климата [15]. База включает результаты ассимиляции

* Лидия Адольфовна Больбасова (sla@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Павел Гаврилович Ковадло (kovadlo2006@rambler.ru); Артем Юрьевич Шиховцев (artempochta2009@rambler.ru).

радиозондовых, самолетных, спутниковых и других данных в узлах регулярной сетки $2,5 \times 2,5^\circ$ по земному шару с 1948 г. по настоящее время. В архиве базы реанализа NCEP/NCAR доступны данные о составляющих скорости ветра для основных изобарических поверхностей в атмосфере через каждые 6 ч на 17 уровнях давления: 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 гПа.

Байкальская астрофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН расположена на берегу оз. Байкал ($51^\circ 50'$ с.ш., $104^\circ 55'$ в.д.) [16]. При усреднении использовались данные четырех ближайших узлов сетки с координатами $50^\circ 00'$ с.ш., $102^\circ 50'$ в.д.; $50^\circ 00'$ с.ш., $105^\circ 00'$ в.д.; $52^\circ 50'$ с.ш., $102^\circ 50'$ в.д.; $52^\circ 50'$ с.ш., $105^\circ 00'$ в.д. Усреднение выполнялось за сутки, а затем месяц, таким образом было получено свыше 10 тыс. значений.

Сезонные вариации высотного распределения скорости ветра

Высотный профиль скорости ветра определяет требования к временным характеристикам адаптивной оптической системы астрономического телескопа через время когерентности атмосферы или частоту Гринвуда [1] следующим образом:

$$f_G = \frac{1}{\tau_0}, \quad \tau_0 = \left(2,91 k^2 \sec^2 \vartheta \int_0^\infty dh C_n^2(h) V_{\text{wind}}(h)^{5/3} \right)^{-3/5}, \quad (1)$$

где f_G — частота Гринвуда; τ_0 — время когерентности атмосферы; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны; ϑ — зенитный угол; $C_n^2(h)$ — высотная

зависимость структурной характеристики показателя преломления; $V_{\text{wind}}(h)$ — высотный профиль скорости ветра. Ветер влияет на два параметра: интенсивность и временную частоту флуктуаций волнового фронта. Интенсивность турбулентности, характеризуемая профилем $C_n^2(h)$, зависит от энергии процесса и увеличивается со скоростью ветра. Временная полоса пропускания волнового фронта линейно возрастает с увеличением скорости ветра.

На рис. 1 представлены высотные профили скорости ветра для каждого месяца, усредненные за период с 1996 по 2016 г. Ветровой режим над БАО формируется под воздействием широтной циркуляции и местных физико-географических условий. Их специфика обусловлена местными свойствами циркуляции атмосферы, формирующейся под влиянием акватории Байкала и горной системы. Данные рис. 1 указывают на сезонность вертикального распределения скорости ветра над БАО. Наиболее слабые ветра характерны для летних месяцев, а наиболее сильные — для зимы на всех рассматриваемых высотах. Вертикальные распределения скорости ветра до высоты 10 км имеют подобный ход с сентября по май. При этом для летних месяцев скорость ветра на этих высотах существенно меньше. Выше 10 км можно выделить несколько типов высотной зависимости: зимний период (с ноября по февраль), теплый (с мая по август), а также зависимости, характерные для марта и октября, для апреля и сентября.

Рис. 2 показывает статистику скорости ветра по высотам для каждого месяца отдельно за весь доступный период с 1948 по 2016 г. Это рассчитанные медианные значения (второй квартиль), нижний квартиль соответствует 25-му квантилю, а верхний — 75-му. Отметим, что интерквартильный размах является характеристикой разброса распределения

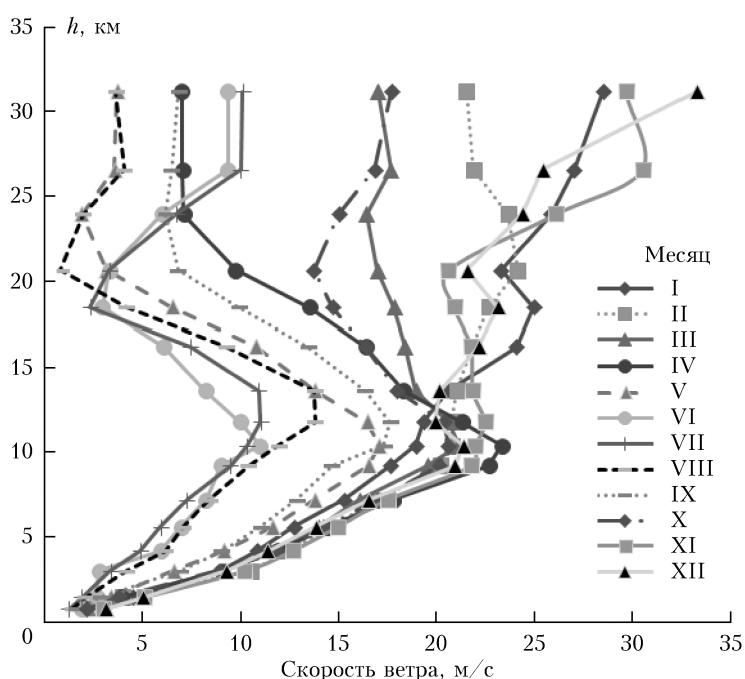


Рис. 1. Средние профили скорости ветра для каждого месяца, рассчитанные по данным реанализа NCEP/NCAR с 1996 по 2016 г.

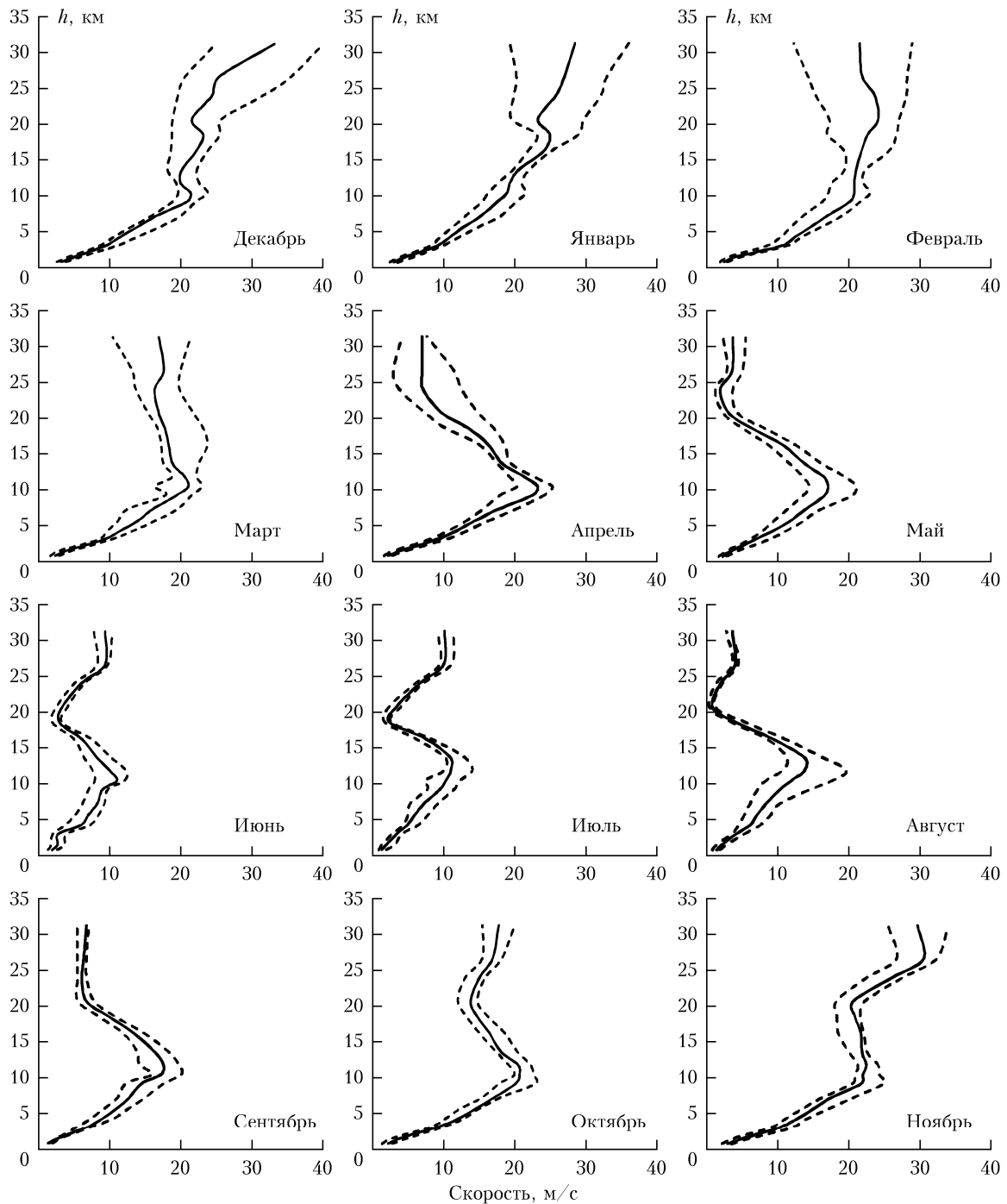


Рис. 2. Медианные значения скорости ветра (сплошные кривые), первый и третий квартили (пунктирные кривые) для каждого месяца, рассчитанные по данным реанализа NCEP/NCAR с 1948 по 2016 г.

величины и аналогом дисперсии. Вместе медиана и интерквартильный размах могут быть использованы вместо математического ожидания и дисперсии в случае распределений с большими выбросами либо при невозможности вычисления последних [17].

Анализ данных рис. 2 показывает, что для зимних месяцев интерквартильный размах наибольший и он увеличивается с высотой. Для летних месяцев его величина, наоборот, уменьшается с высот ~15 км.

Высотная зависимость скорости ветра имеет подобный ход для зимнего времени года, летнего, а также в апреле, мае и сентябре. Месяц с самой большой скоростью ветра — ноябрь, а самая низкая скорость ветра наблюдается в июне и июле.

Таким образом, с учетом ветрового режима БАО наиболее благоприятными месяцами для функционирования системы адаптивной оптики является теплый период, особенно июнь и июль. Существенное

увеличение полосы частот адаптивной оптической системы телескопа может потребоваться в зимний сезон, а значит, требования к быстродействию элементов адаптивной оптики и системы в целом могут стать труднодостижимыми.

Как видно из рис. 1 и 2, профили скорости ветра имеют максимум на уровне струйного потока (200 гПа). В результате могут появляться слои турбулентности на высотах 9–12 км. Наиболее эффективная коррекция искажений оптического излучения, вызываемых подобными слоями, возможна с помощью многоспрямленной системы адаптивной оптики, использующей несколько деформируемых зеркал и датчиков волнового фронта. Доказательства многослойной структуры турбулентности, создаваемой сдвигом ветра на высотах 10 км, можно найти в [18]. Толщина турбулентных слоев, по оценкам авторов [18], составляет порядка 2,5 км.

Интересны поведение высотного профиля скорости ветра в зимний период над БАО, когда отсутствует явный максимум, и увеличение скорости ветра с уровня 180 мбар (высота 12 км над ур. м.). При этом величину скорости ветра на уровне 200 гПа V200 было предложено использовать как астроклиматический параметр для оценки применимости систем адаптивной оптики в связи с обнаруженной корреляцией с астрономическим качеством изображения для крупных астрономических обсерваторий [5, 7, 8].

В нашей работе впервые проанализированы данные о V200 для БАО как астроклиматическом параметре. Поэтому в первую очередь выполнено сравнение с сезонным ходом астрономического качества изображения. Традиционно в астрономических наблюдениях для оценки качества изображения используется безразмерный параметр FWHM (Full Width at Half Maximum) – ширина функции размытия точки на половине максимума в угловых секундах, определяемый приближенной формулой

$$\text{FWHM} \approx 0,98 \frac{\lambda}{r_0}, \quad (2)$$

где r_0 – параметр Фрида.

На рис. 3 представлены V200 и FWHM (2) на основе измерений параметра Фрида датчиком волнового фронта Шэка–Гартмана адаптивной оптической системы БСВТ БАО [19]. Их сравнение свидетельствует о связи астрономического качества изображения и скорости ветра на уровне 200 гПа, а значит, позволяет использовать эту величину как астроклиматический показатель качества изображений для БАО. Отметим, что лето и осень характеризуются наилучшим качеством изображения.

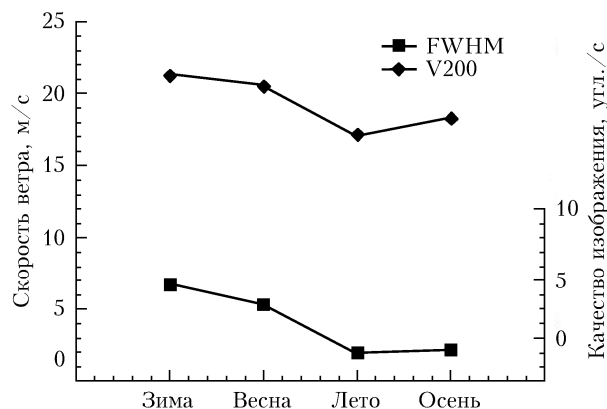


Рис. 3. Сезонный ход скорости ветра на уровне 200 гПа по данным реанализа NCEP/NCAR и астрономического качества изображения, рассчитанного из измерений параметра Фрида датчиком волнового фронта Шэка–Гартмана адаптивной оптической системы БСВТ из [19]

В таблице суммируются статистические данные: среднее и медианное значения, среднеквадратическое отклонение (СКО) скорости ветра на уровне 200 гПа.

Анализ статистических данных показывает, что наиболее сильные ветра на уровне 200 гПа появляются зимой, наиболее слабые – летом. С октября по апрель средние значения скорости ветра лежат в диапазоне 19–21 м/с. Ее уменьшение начинается в мае и продолжается до июля, с августа скорость увеличивается. Минимальные средние значения наблюдаются летом (0–12 м/с), а максимальные – зимой (в среднем не больше 25 м/с). Месяц с наименьшими значениями V200 – июль (10 м/с), самая большая скорость ветра наблюдается в ноябре (22 м/с). При этом величины скорости ветра на уровне 200 гПа для всех сезонов существенно ниже известных данных мировых астрономических обсерваторий [10]. Гистограмма распределения скорости ветра на уровне 200 гПа, рассчитанная по данным реанализа NCEP/NCAR за 1948–2016 гг. для БАО, представлена на рис. 4.

Можно обнаружить бимодальное распределение, свидетельствующее о двух режимах с максимумами 12 и 22 м/с, вероятно, соответствующих зимнему и летнему сезонам.

Скорость ветра на этой высоте часто связывают со струйным течением, определяемым как узкая зона сильного ветра в верхней тропосфере, ограниченная сверху тропопаузой. Высота тропопаузы над БАО была оценена по данным реанализа NCEP/NCAR (рис. 5). Полученные значения подтверждают сезонные изменения высоты тропопаузы

Статистика скорости ветра на уровне 200 гПа по данным реанализа NCEP/NCAR в 1948–2016 г. над БАО

Параметр, м/с	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Среднее значение	19,49	19,33	20,13	19,92	17,39	11,77	10,82	13,98	16,18	19,52	21,41	20,48
Медианное значение	19,86	19,59	20,21	19,78	17,44	11,38	10,54	13,46	16,48	19,63	21,36	20,61
СКО	3,88	3,90	3,49	4,17	3,95	3,98	4,29	5,11	4,08	4,07	3,65	3,17

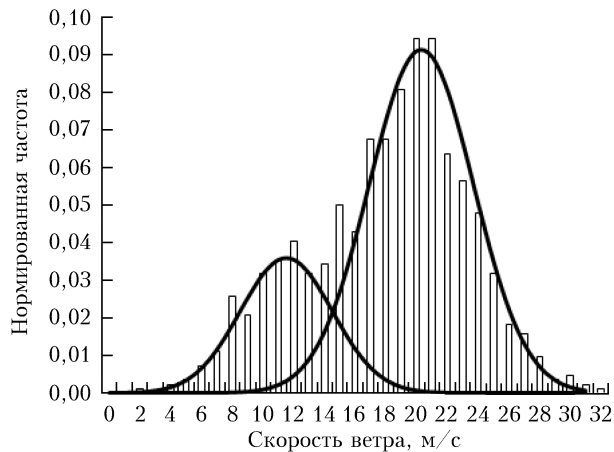


Рис. 4. Распределение скорости ветра на уровне 200 гПа, рассчитанное по данным реанализа NCEP/NCAR с 1948 по 2016 г.

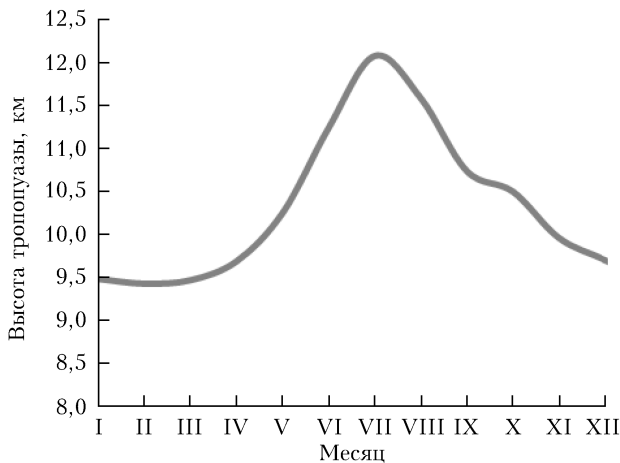


Рис. 5. Высота тропопаузы над БАО по данным реанализа NCEP/NCAR

над БАО. Самая низкая тропопауза наблюдается зимой, самая высокая — летом, при этом изменение V_{200} имеет противоположную тенденцию.

В целом результат анализа данных скорости ветра на уровне 200 гПа свидетельствует о повышенных требованиях к системе адаптивной оптики в зимний период.

Модель высотной зависимости скорости ветра над БАО

При разработке систем адаптивной оптики на начальной стадии проектирования необходимо использовать модельные зависимости профиля турбулентности и скорости ветра. Следуя работе [20], для среднего профиля скорости ветра мы применили модель Гринвуда — модель с гауссовым распределением и пиковой скоростью ветра вблизи тропопаузы:

$$V_{\text{wind}}^2(h) = \left[v_{\text{ground}} + v_T \exp \left\{ -\frac{(h \sin \theta - H_T)^2}{L_T^2} \right\} \right]^2, \quad (3)$$

где $V_{\text{wind}}(h)$ — высотный профиль скорости ветра; v_{ground} — значения скорости ветра у поверхности земли; v_T — значения скорости ветра в тропосфере на уровне 200 гПа; H_T — высота верхней границы тропосферы; L_T — толщина тропопаузы.

Отметим, что широко используемая в адаптивной оптике модель Бафтона является ее частным случаем:

$$V_{\text{wind}}^2(\xi) = \left[8 + 30 \exp \left\{ -\left(\frac{\xi \sin(\alpha) - 9400}{4800} \right)^2 \right\} \right]^2. \quad (4)$$

Используя числовые данные для теплого сезона, представленные выше, и данные приземных измерений (рис. 6), получим следующее выражение:

$$V_{\text{wind}}^2(\xi) = \left[1,1 + 10,45 \exp \left\{ -\frac{(\xi - 11450)^2}{6465^2} \right\} \right]^2. \quad (5)$$

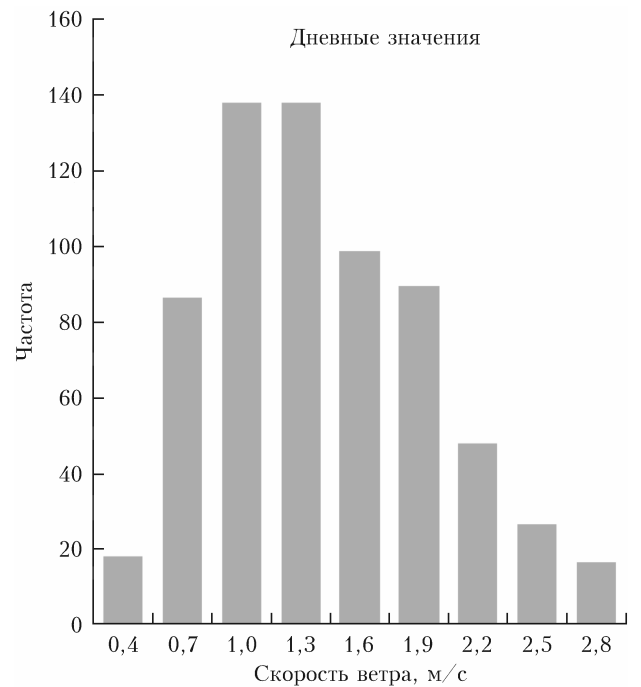


Рис. 6. Распределение приземной скорости ветра по данным приземных измерений вблизи БСВТ БАО с помощью ультразвуковой метеостанции

Данные приземных измерений скорости ветра, представленные на рис. 6, были получены вблизи БСВТ БАО в теплый период с помощью автоматизированного ультразвукового метеорологического комплекса «Метео-2» [21].

На рис. 7 показаны высотный профиль скорости ветра, рассчитанный с использованием предложенной нами модели (4), и усредненные для летнего сезона значения скорости ветра по данным реанализа NCEP/NCAR. Видно удовлетворительное согласие между модельными данными и данными NCEP/NCAR.

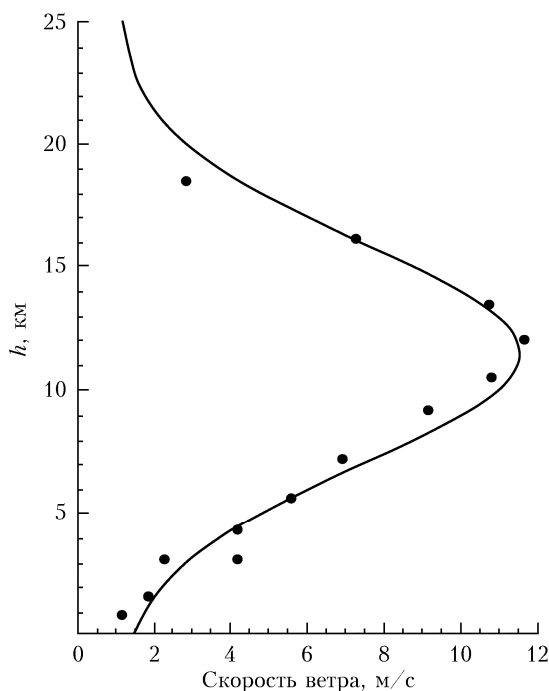


Рис. 7. Профиль скорости ветра, рассчитанный по предложенной модели, и данные реанализа NCEP/NCAR (точки) для летнего сезона

Подчеркнем, что скорость ветра в виде (3)–(4) входит в модель структурной характеристики показателя преломления Хафнагеля–Волли, которая, в свою очередь, определяет ряд параметров адаптивных оптических систем, работающих в атмосфере.

Заключение

Представлен анализ сезонных вариаций высотного профиля скорости ветра до высот ~31 км над Байкальской астрофизической обсерваторией ИСЗФ СО РАН по данным реанализа NCEP/NCAR за 1948–2016 гг. Предложена модель профиля скорости ветра, особенностью которой является учет скорости ветра на уровне 200 гПа (V200) как астроклиматического показателя качества изображений. Выявлены сезонные особенности в вертикальном профиле скорости ветра над БАО. Наиболее высокие значения скорости ветра наблюдаются в холодный период, наиболее низкие — летом. Аналогичные изменения имеют место для астроклиматического параметра V200 и противоположные — для высоты тропопаузы над БАО. Месяц с наименьшими значениями V200 — июль (10 м/с), а самая большая скорость ветра наблюдается в ноябре (22 м/с). При этом наиболее сильные ветра обычно обнаруживаются между 9 и 12 км, этот сдвиг ветра может создавать дополнительный слой турбулентности в области тропопаузы. Сочетание высоких значений скорости ветра и интенсивности турбулентности в зимний период может налагать повышенные требования на частоту системы адаптивной оптики БСВТ, сделав ее работу менее эффективной в холодный сезон.

Наиболее благоприятными месяцами для функционирования системы адаптивной оптики с учетом ветрового режима БАО являются июнь и июль и теплый период в целом.

1. Hardy J.W. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes. Oxford: Oxford University Press, 1998. 448 p.
2. Лавринов В.В. Динамическое управление адаптивно-оптической коррекцией турбулентных искажений лазерного излучения // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 10. С. 893–901.
3. Males J.R., Guyon O. Ground-based adaptive optics coronagraphic performance under closed-loop predictive control // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 2018. V. 4, N 1. P. 019001-1–21.
4. Chueca S., Garcia-Lorenzo B., Muñoz-Tuñín C., Fuensalida J.J. Statistics and analysis of high-altitude wind above the Canary Islands observatories // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2004. V. 349. P. 627–631.
5. Garcia-Lorenzo B., Fuensalida J.J., Muñoz-Tuñín C., Mendizabal E. Astronomical site ranking based on tropospheric wind statistics // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2005. V. 356. P. 849–858.
6. Carrasco E., Avila R., Carramiñ A. High-Altitude Wind Velocity at Sierra Negra and San Pedro Mártir // Publ. Astron. Soc. Pacific. 2005. V. 117. P. 104–110.
7. Garcia-Lorenzo B., Eff-Darwich A., Fuensalida J.J., Castro-Almazán J. Adaptive optics parameters connection to wind speed at the Teide Observatory // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2009. V. 397. 1633–1646.
8. Sarazin M., Tokovinin A. The statistics of isoplanatic angle and adaptive optics time constant derived from DIMM data, in: Beyond conventional adaptive optics // Proc. ESO Workshop Beyond conventional Adaptive Optics. 2002. P. 321–328.
9. Vernin J. Astronomical site selection: A new meteorological approach // Proc. SPIE. 1986. V. 0628. P. 626–628.
10. Varela A.M., Muñoz-Tuñín C., Garcia Lorenzo B., Fuensalida J., Castro-Almazán J. On the Use of Remotely Sensed Data for Astronomical Site Characterization. 2012. P. 1–18. URL: http://www.iac.es/proyecto/site-testing/images/stories/pdf/varela_et_al_2012.pdf (last access: 20.01.2019).
11. Hagelin S., Masciadri E., Lascaux F. Wind speed vertical distribution at Mt Graham // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2010. V. 407. P. 2230–2240.
12. Garcia-Lorenzo B., Eff-Darwich A., Fuensalida J.J., Castro-Almazán J. Adaptive optics parameters connection to wind speed at the Teide Observatory: Corrigendum // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2011. V. 414, N 2. P. 801–809.
13. Hach 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 Oukaïmeden — I. Meteorological parameters analysis and tropospheric wind regimes // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2012. V. 420, N 1. P. 637–650.
14. Sánchez L.J., Cruz-González I., Echevarría J., Ruelas-Mayorga A., García A.M., Avila R., Carrasco E., Carramiñana A., Nigoche-Netro A. Astroclimate at san pedro Mártir — I. Seeing statistics between 2004 and 2008 from the thirty meter telescope site-testing data // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2012. V. 426. P. 635–646.
15. Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woollen, JChelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., van den Dool H., Jenne R., Fiorino M. The NCEP–NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means

- CD-ROM and Documentation // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2001. V. 82. P. 247–267.
16. Heck A. Star Guides Plus: A World-Wide Directory of Organizations in Astronomy and Related Space Sciences. Springer Science & Business Media, 2013. 1140 p.
 17. Шуленни В.П. Математическая статистика. Томск: Изд-во НТЛ, 2012. 540 с.
 18. Vermin J., Roddier F. Experimental determination of two-dimensional spatiotemporal power spectra of stellar light scintillation Evidence for a multilayer structure of the air turbulence in the upper troposphere // J. Opt. Soc. Am. 1973. V. 63. P. 270–273.
 19. Konyaev P.A., Kopulov E.A., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Selin A.A., Shikhovtsev A.Yu. Works on a set of data measuring turbulence in different seasons of the year // Proc. SPIE. 2007. V. 10466. P. 104660N-1–104660N-5.
 20. Roberts L.C., Bradford L.W. Improved models of upper-level wind for several astronomical observatories // Opt. Express. 2011. V. 19. P. 820–837.
 21. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торзаев А.В. Оптические свойства турбулентности в горном пограничном слое атмосферы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 153 с.

L.A. Bolbasova, V.P. Lukin, A.Yu. Shikhovtsev, P.G. Kovadlo. **Seasonal statistics of the vertical distribution of wind speed at the Baikal Astrophysical Observatory.**

Seasonal changes in the altitude distribution of wind speed in the lake Baikal region for the Baikal Astrophysical Observatory of the ISSP SB RAS are studied in connection with the task of developing an adaptive optics system of the Large Solar Vacuum Telescope. The data of NCEP/NCAR in the period 1948–2016 are analyzed. Average and median values, first and third quartiles of the wind speed profiles to an altitude of 32.5 km are calculated for each month of the year. The seasonal variations in the tropopause height are obtained from NCEP/NCAR data. A model for the wind speed profile is suggested. A feature of the model is the consideration of wind speed at 200 hPa as an indicator of the quality of astronomical images.