

АСТРОКЛИМАТ ОБСЕРВАТОРИИ ПИК ТЕРСКОЛ

Е.А. Копылов¹, Л.А. Больбасова², А.Ю. Шиховцев³, С.А. Потанин^{1,4}, А.М. Сачков¹

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия,
kopylov@inasan.ru

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

⁴Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ASTROCLIMATE OF THE TERSKOL PEAK OBSERVATORY

Е.А. Kopylov¹, L.A. Bolbasova², A.Yu. Shikhovtsev³, S.A. Potanin^{1,4}, A.M. Sachkov¹

¹Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
kopylov@inasan.ru

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB RAS, Tomsk, Russia

³Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

⁴Moscow State University Faculty of Physics, Moscow, Russia

Аннотация. Характеристики атмосферной турбулентности имеют важное значение для определения качества астрономического видения изображений и внедрения адаптивных систем. В работе исследуются вертикальные распределения оптической турбулентности в обсерватории Пик Терскол (43.27472° N 42.50083° E, 3127 м над у.м.) с использованием повторного реанализа Era-5, оптических сцинтилляционных измерений и данных ультразвуковой станции «Метео-2». Представлены результаты сезонных изменений параметров астроклимата для обсерватории Терскол. Рассчитанные вертикальные профили $C_n^2(z)$ сравниваются с распределением интенсивности турбулентности по вертикали, полученным из томографических измерений с помощью датчика Шака-Гартмана.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, Era-5, Метео-2, обсерватория Терскол

Abstract. Atmospheric turbulence characteristics are important for determining the quality of astronomical imaging and implementing adaptive systems. The paper studies the vertical distributions of optical turbulence at the Terskol Peak Observatory (43.27472° N 42.50083° E, 3127 m above sea level) using the Era-5 reanalysis, optical scintillation measurements and the Meteo-2 ultrasound station data. The results of seasonal changes in astroclimate parameters for the Terskol Observatory are presented. The calculated vertical profiles of $C_n^2(z)$ are compared with the vertical turbulence intensity distribution obtained from tomographic measurements using the Shack-Hartmann sensor.

Keywords: atmospheric turbulence, Era-5, Meteo-2, Terskol Observatory

Целью данного исследования является оценка качественных характеристик ночных изображений в обсерватории пика Терскол, где проводился оптический мониторинг турбулентности. Используя дистанционные оптические измерения, мы определили вертикальные распределения интенсивности оптической турбулентности над обсерваторией Пик Терскол. Вертикальные распределения интенсивности турбулентности были получены в условиях хорошего и посредственного качества изображения. Во-вторых, для оценки вертикальных профилей структурной постоянной турбулентных колебаний показателя преломления воздуха C_n^2 мы использовали градиентный метод, основы которого были созданы Татарским.

Для моделирования вертикальных профилей $C_n^2(z)$ мы использовали пятый набор данных повторного анализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (Era-5) [Hersbach et al., 2020]. Era-5 содержит данные наблюдений со всего мира с 1940 г. по

настоящее время. По сравнению с предыдущими базами данных Era-5 демонстрирует значительные улучшения как в пространственном разрешении, так и в точности характеристик атмосферы [Rao et al., 2024]. Повторный анализ содержит усвоенные метеорологические характеристики, включая компоненты температуры и скорости ветра при различных уровнях давления. Временное разрешение данных составляет 1 ч, пространственное по горизонтали — около 30 км. В частности, для ближайшего к обсерватории узла сетки использовались почасовые значения температуры воздуха и горизонтальных составляющих скорости ветра на различных поверхностях давления.

Для оценки вертикального распределения оптической турбулентности использовались данные оптических измерений, выполненных с использованием датчика Шака-Гартмана [Potanin et al., 2022]. Данные были получены в ночь с 18 на 19 марта 2023 г. (рис. 1).

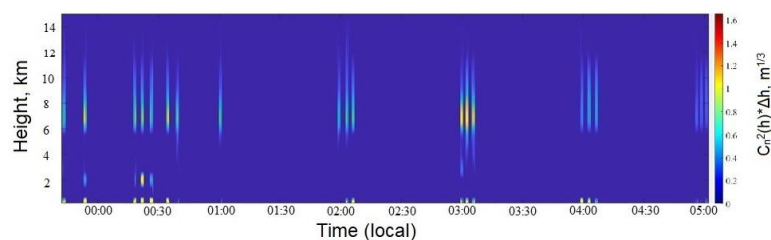


Рис. 1. Вертикальные распределения оптической турбулентности в ночное время на обсерватории пик Терскол 18–19 марта 2023 г.

Анализируя эти цифры, мы видим, что ярко выраженные турбулентные слои образуются на высотах 7–8 км и 2–2.5 км над землей. Турбулентный слой на этих высотах приводит к значительному снижению качества изображения. Например, параметр β , определяемый интегралом C_n^2 по высоте, увеличивается с 0.63 до 1.68". Эти изменения обусловлены, главным образом, возникновением интенсивных турбулентных колебаний показателя преломления воздуха в этих слоях.

Известно, что нижняя часть пограничного слоя атмосферы вносит основной вклад в формирование интегральной оптической турбулентности (вдоль линии видимости) и, как следствие, в разрешающую способность наземного телескопа. В пределах этого слоя вариации интенсивности оптической турбулентности наиболее плохо описаны, как по времени, так и по высоте. По крайней мере, точность оценки и прогнозирования оптической турбулентности на основе стандартных атмосферных моделей или небольшого объема данных оптических дистанционных измерений недостаточна для планирования времени наблюдения. Для получения правильной формы профилей оптической турбулентности в нижних слоях атмосферы при различных атмосферных условиях мы проанализировали данные измерений, выполненных с помощью ультразвукового анемометра «Метео-2», который был установлен на метеорологической мачте на площадке обсерватории Пик Терскол. Ниже для расчетов характеристик атмосферной турбулентности мы использовали данные квазинепрерывных измерений ультразвукового анемометра за длительный период (с 01.01 2023 г. по 31.12.2023 г.). Благодаря высокочастотным измерениям (10 Гц) поля ветра и температуры мы рассчитали ряд характеристик турбулентности, включая вертикальные профили C_n^2 (рис. 2).

Для сравнения мы также сравниваем вариации параметра Фрида r_0 в месте расположения пика Терскол. Для оценки r_0 использовались климатическая модель Хафнагеля–Валли (HV). Среднемесячные значения высотного профиля скорости ветра,

применяемые в модели HV, получены из базы данных реанализа ECMWF ERA5 (рис. 3).

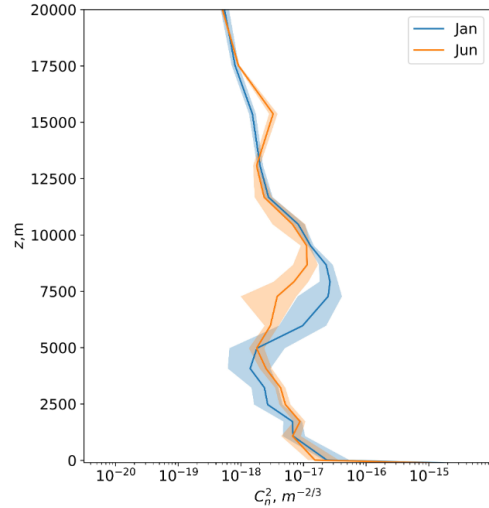


Рис. 2. Ночные вертикальные профили C_n^2 над обсерваторией Пик Терскол, 2023 г. Синяя линия соответствует январю, оранжевая линия — июню

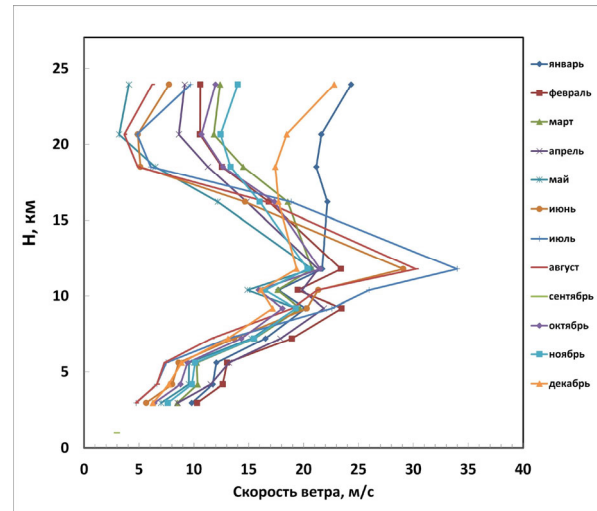


Рис. 3. Высотный профиль скорости ветра, усредненный за 3 года (2020–2022 гг.) для обсерватории Терскол для каждого месяца года по данным реанализа ERA5

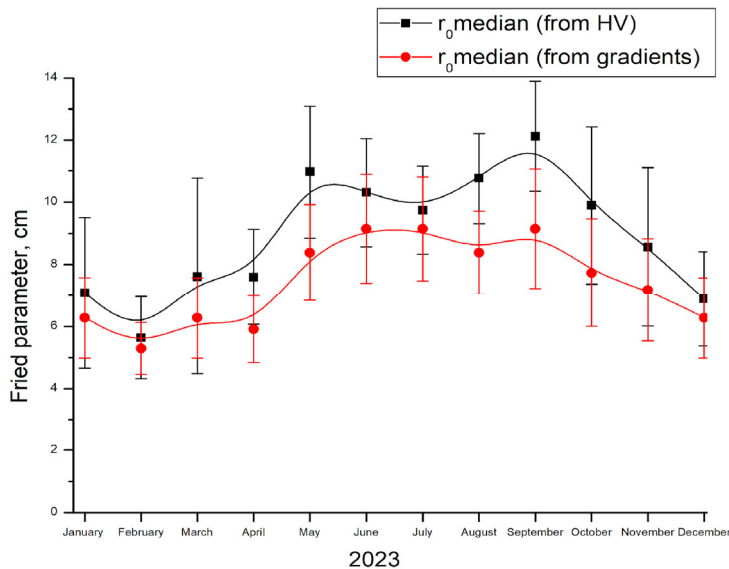


Рис. 4. Вариация радиуса Фрида r_0 за 2023 г. для обсерватории Пик Терскол

На рис. 4 показаны изменения параметра Фрида r_0 в обсерватории пика Терскол. Как вы можете видеть из рисунка, участок пика Терскол имеет высокое качество изображения, близкое к лучшим местам в мире. В частности, летом β составляет около 1.0–1.2 угловой секунды, в пересчете на r_0 эти значения соответствуют 8.3–10.0 см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Hersbach H., Bell B. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. V. 146. P. 730, 384. <https://doi.org/10.1002/qj.38031>.

Potarin S.A. et al. A Facility for the Study of Atmospheric Parameters Based on the Shack–Hartmann Sensor // Astrophysical Bulletin. 2022. V. 77. P. 214–221. <https://doi.org/10.1134/S1990341322020067>.

Rao P., Wang F., Yuah X. et al. Evaluation and comparison of 11 sets of gridded precipitation products over the Qinghai-Tibet Plateau // Atmospheric Res. 2024. V. 302. P 10731. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107315>.