

## СПЕКТРЫ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРА $C_2^n$ В РАЙОНЕ ОБСЕРВАТОРИЙ МАЙДАНАК И СУФФА В УЗБЕКИСТАНЕ

<sup>1</sup>А.Ю. Шиховцев, <sup>1</sup>П.Г. Ковадло, <sup>2</sup>Е.А. Копылов, <sup>2</sup>М.А. Ибрагимов, <sup>3,4</sup>С.А. Эхгамбердиев, <sup>3,4</sup>Ю.А. Тиллаев

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

<sup>2</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

kopylov.phd@ya.ru

<sup>3</sup>Астрономический институт Улугбека Академии наук Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

<sup>4</sup>Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

## ATMOSPHERIC TURBULENCE SPECTRUM FOR CALCULATING THE $C_2^n$ PARAMETER IN THE AREA OF THE MAIDANAK AND SUFFA OBSERVATORIES IN UZBEKISTAN

<sup>1</sup>A.Yu. Shikhovtsev, <sup>1</sup>P.G. Kovadlo, <sup>2</sup>E.A. Kopylov, <sup>2</sup>M.A. Ibrahimov, <sup>3,4</sup>S.A. Ehgamberdiev, <sup>3,4</sup>Yu.A. Tillyayev

<sup>1</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Astronomy RAS, Moscow, Russia

kopylov.phd@ya.ru

<sup>3</sup>Ulug Beg Astronomical Institute, Uzbek Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

<sup>4</sup>National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

**Аннотация.** Знание спектров турбулентности представляет интерес для описания атмосферных условий применительно к астрономическим наблюдениям. Обсуждаются деформации спектров турбулентности с высотами в широком диапазоне масштабов на площадках обсерваторий Майданак и Суффа. Показано, что энергия бароклинной неустойчивости высока на площадках этих обсерваторий и должна учитываться при расчетах структурной постоянной показателя преломления.

**Ключевые слова:** астроклимат, телескоп, оптическая турбулентность, спектр турбулентности.

**Abstract.** Knowledge of the turbulence spectra is of interest for describing atmospheric conditions as applied to astronomical observations. This article discusses the deformations of the turbulence spectra with heights in a wide range of scales at the sites of the Maidanak and Suffa observatories. It is shown that the energy of baroclinic instability is high at the sites of these observatories and should be taken into account in the calculations of the refractive index structure constant  $C_2^n$ .

**Keywords:** astroclimate, telescope, optical turbulence, turbulence spectrum.

### ВВЕДЕНИЕ

Изучению атмосферы и, в частности, оптической турбулентности над солнечными и звездными телескопами наземного базирования уделяется в мире существенное внимание. С одной стороны, проектирование новых наземных телескопов нуждается в информации о характеристиках как в приземном слое, так и на разных высотах в атмосфере. Планирование наблюдательного времени на астрономическом телескопе связано с диагностикой и прогнозом атмосферных условий, включая средние метеорологические характеристики, характеристики оптической и динамической турбулентности, облачность и продолжительность солнечного сияния.

Обсуждаются особенности энергетических спектров флуктуаций температуры воздуха и скорости ветра, оценивается энергетика в синоптическом диапазоне для описания атмосферных характеристик в астрономических обсерваториях Узбекистана. Мы получили и проанализировали энергетические спектры атмосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов для астрономических обсерваторий Майданак (2650 м, 38°40'24" N, 66°53'47" E) и Суффа (2324 м, 39°37'27" N, 68°26'52" E).

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В УЗБЕКИСТАНЕ

Единого метода к определению величины  $C_2^n$  на разных высотах в атмосфере нет. Во многом это связано с физическими особенностями формирова-

ния турбулентности в атмосферном пограничном слое и свободной атмосфере. Более того, модель колмогоровской однородной и изотропной турбулентности справедлива только для узкого диапазона масштабов. В работе [Osborn, Sarazin, 2014] получена глобальная карта свободной атмосферы  $\beta$ . По нашему мнению, значения  $\beta$  существенно занижены в приэкваториальной зоне. Это указывает на то, что метод расчета характеристик турбулентности, включая  $C_2^n$ , должен быть выбран и адаптирован для конкретного места. Для определения возможностей применения метода [Kovadlo, 2019] и выбора оптимального подхода к расчету  $C_2^n(z)$  мы определили средние энергетические спектры флуктуаций на разных высотах в атмосфере. Для расчета энергетических спектров мы использовали почасовые данные об уровнях давления базы данных Era-5 — глобального атмосферного анализа пятого поколения с увеличенным временным (1 ч), горизонтальным (0.25°) и вертикальным разрешением (137 уровней вертикальной модели от поверхности до 0.01 ГПа) [Hersbach, et al., 2020].

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ПЛОЩАДКЕ ОБСЕРВАТОРИЙ МАЙДАНАК И СУФФА

Мы рассчитали энергетические спектры флуктуаций температуры воздуха для всех изобарических поверхностей, доступных в реанализе. Однако мы обсуждаем отдельные спектры в нижней, средней и

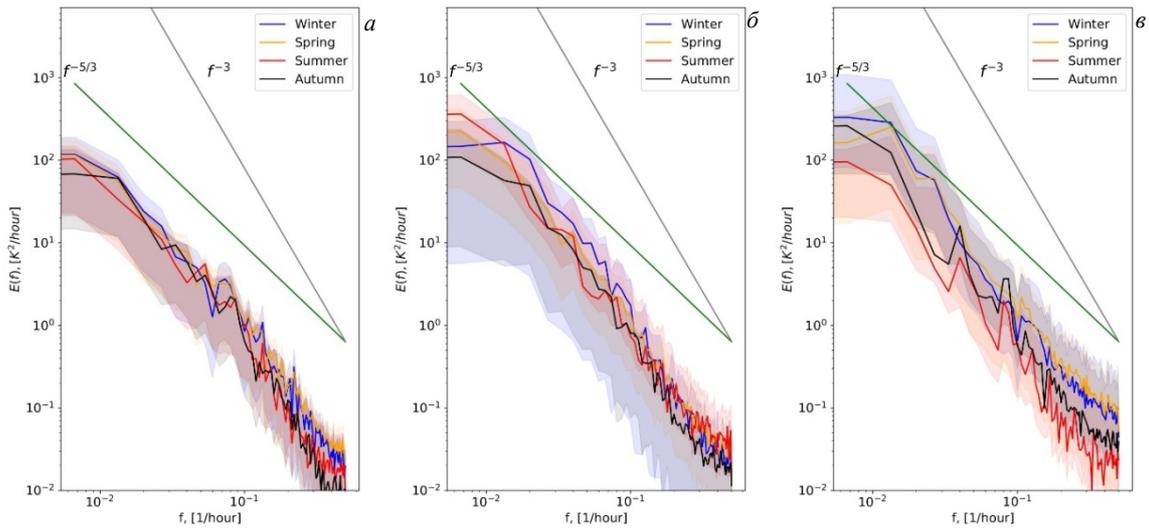


Рис. 1. Энергетические спектры колебаний температуры воздуха в обсерватории Майданак для разных изобарических уровней: 100 гПа (а), 300 гПа (б), у поверхности (в)

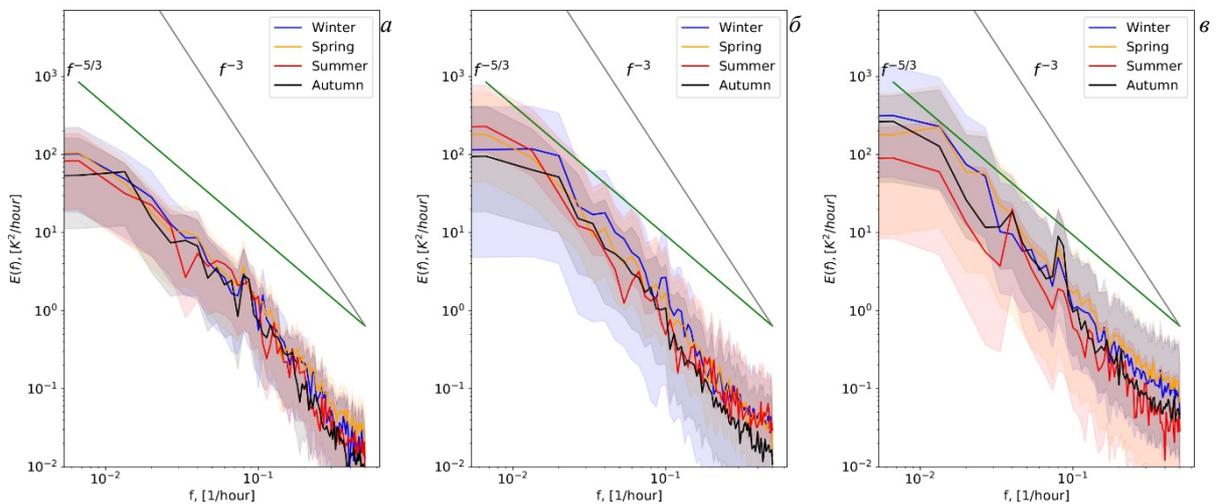


Рис. 2. То же для обсерватории Суффа

верхней оптически активной атмосфере. Для астрономических обсерваторий Майданак и Суффа спектры показаны для приземного слоя атмосферы, 700 гПа (350 м), 300 гПа (6.5 км) и 100 гПа (13.6 км).

На рис. 1, 2 показаны энергетические спектры колебаний температуры воздуха для разных изобарических уровней и сезонов года. Для каждого спектра рассчитан 95 % доверительный интервал.

Анализ показывает, что в приземном слое атмосферы спектр имеет два наклона:  $-5/3$  в высокочастотной части (до 7.7 ч) и  $-3$  в низкочастотном диапазоне. С высотой диапазон с наклоном  $5/3$  сужается. На изобарическом уровне 100гПа спектр в высокочастотном диапазоне частот имеет наклон  $-3$ . Спектры флуктуаций скорости ветра существенно отличаются от спектров флуктуаций температуры воздуха. В нижних слоях атмосферы спектры показывают наклон  $-5/3$  для широкого диапазона. В низкочастотной области интервал с наклоном  $-3$  выделяется с трудом. С высотой энергия низкочастотных флуктуаций скорости ветра увеличивается и диапазон с наклоном  $-3$  расширяется в область низких

частот. На высотах 200–300 гПа спектр в низкочастотной части описывается - степенная зависимость почти во всём спектральном диапазоне. В высокочастотной части спектра формируется степенная зависимость с наклоном  $-5/3$ . На уровне 100 гПа спектры флуктуаций скорости ветра подобны спектрам флуктуаций температуры воздуха. Однако наблюдается повышенная интенсивность флуктуаций скорости ветра в диапазоне 12–24 ч. По температурным флуктуациям мы рассчитали значения энергии в низкочастотном диапазоне от  $f_1=6.7 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$  до  $f_2=13.3 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ , а также в высокочастотном интервале — от  $f_3=0.36 \text{ ч}^{-1}$  до  $f_4=0.5 \text{ ч}^{-1}$ .

Сильные флуктуации как в НЧ-, так и ВЧ-диапазоне наблюдаются в нижних слоях атмосферы, который вносит преимущественный вклад в оптическую турбулентность и качество астрономических изображений. На изобарическом уровне 200 гПа, на высоте которого формируются струйные течения, температурные флуктуации также значительны. Можно заметить, что наименьшая интенсивность флуктуаций температуры воздуха соответствует летнему и осен-

нему периодам. Зимой и весной интенсивность низкочастотных температурных флуктуаций увеличивается. Стоит заметить, что качество астрономических изображений  $\beta$  в месте расположения обсерватории Майданак является наилучшим в летнее и осеннее время [Artamonov et al., 2010].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергетические спектры флуктуаций температуры воздуха в обсерваториях Майданак и Суффа, рассчитанные по данным реанализа Era-5, примерно подчиняются степенным зависимостям  $-5/3$  в узком ВЧ-диапазоне и в целом имеют наклон от  $-3$  до  $-2$  в НЧ-диапазоне. Четкая зависимость  $-3$  наблюдалась только для узкого спектрального интервала. В обсерватории Майданак характер сезонных изменений НЧ- и ВЧ-флуктуаций температуры, связанных с бароклинной неустойчивостью атмосферы, качественно хорошо согласуется с изменениями, рассматриваемыми в [Artamonov et al., 2010]. Наилучшие атмосферные условия, определяемые энергией температурных спектров, наблюдаются также в летний и осенний сезоны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2021-982 от 13 октября 2021 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Artamonov B.P., Bruevich V.V., Gusev A.S., et al. Seeing and atmospheric extinction at Mt. Maidanak Observatory from observations with the 1.5-m AZT-22 Telescope. *Astronomy Rep.* 2010. Vol. 54, no. 11. P. 1019–1031. DOI: [10.1134/S1063772910110077](https://doi.org/10.1134/S1063772910110077).

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly J. Royal Meteorological Society.* 2020. Vol. 146, no. 730. P. 1999–2049. DOI: [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803).

Kovadlo P.G., Lukin V.P., Shikhovtsev A.Yu. Development of the model of turbulent atmosphere at the Large Solar Vacuum Telescope site as applied to image adaptation. *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2019. Vol. 32. P. 202–206. DOI: [10.1134/S1024856019020076](https://doi.org/10.1134/S1024856019020076).

Osborn J., Sarazin M. Atmospheric turbulence forecasting with a General Circulation Model for Cerro Paranal. *MNRAS*, 2014. Vol. 480, no. 1. P. 1278–1299. DOI: [10.1093/mnras/sty1898](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1898).