

О ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА ЗВЕЗДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО СРЕДНИМ МНОГОЛЕТНИМ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫМ ДАННЫМ

О. Б. Васильев, Н. Ф. Нелюбин

По материалам наблюдений Зеленчукской экспедиции ГАО АН СССР за 1961—1966 г. проведено спектральное разложение по гармоническим составляющим средних многолетних среднемесячных значений метеохарактеристик и угла турбуленции в месте установки БТА. Рассмотрено однопараметрическое представление (в зависимости от температуры и модуля ее производной) метеохарактеристик и угла турбуленции. Сходимость вычисленных и наблюдаемых значений при однопараметрическом представлении оказалась весьма посредственной, в отдельных случаях — плохой. Получено четырехпараметрическое представление угла турбуленции (в зависимости от давления, скорости ветра, температуры, влажности и их производных). Среднеквадратичное относительное отклонение вычисленных значений от наблюдаемых в этом случае составляет лишь 2%. Ввиду того что указанные представления получены для средних многолетних среднемесячных данных, работа носит чисто оценочный характер.

On the basis of observational data, obtained during the Zelenchuk expedition (1961—1966) of the Main Astronomical Observatory of the USSR Academy of Sciences, a harmonical spectral analysis of the average of multiannual mean monthly values of the meteorological characteristics and the turbulence angle in the BTA site was made. A one-parameter presentation of the meteorological characteristics and the turbulence angle (as a function of the temperature and the module of its derivative) was considered. The convergence of the calculated and the observed values in the event of one-parameter presentation proved to be rather fair and in some cases bad. A four-parameter presentation of the turbulence angle (as a function of pressure, wind velocity, temperature, humidity, and their derivatives) is obtained. The root-mean-square relative deviation of the calculated values from the observed is equal to no more than 2%. As the above presentations are obtained for the average of multiannual mean monthly data, the results are of a purely estimative character.

Для того чтобы наиболее эффективно использовать возможности больших телескопов, желательно заранее знать состояние земной атмосферы в предполагаемый момент наблюдений: ее метеохарактеристики и параметры неустойчивости. Оптическая неустойчивость земной атмосферы приводит к мерцанию и дрожанию звезд, а также к образованию в фокальной плоскости телескопа турбулентного диска, иногда значительно превосходящего дифракционное изображение звезды (особенно у больших телескопов). Этот диск почти всегда деформирован, изображение его бывает диффузным, с течением времени меняется распределение интенсивности по его поверхности. Все эти возмущения ухудшают «качество звездных (астрономических) изображений».

Прогноз метеохарактеристик может быть составлен известными способами. В целях поиска путей к прогнозированию также и качества звездных изображений в настоящей работе по средним многолетним среднемесячным данным проводится исследование возможной связи между величиной угла турбуленции (качеством звездных изображений) и метеохарактеристиками приземного слоя атмосферы.

§ 1. ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СРЕДНИХ МНОГОЛЕТНИХ СРЕДНЕ-МЕСЯЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ МЕТЕОХАРАКТЕРИСТИК И УГЛА ТУРБУЛЕНЦИИ

Известно, что колебания параметров земной атмосферы имеют 12- и 6-месячные периоды, в частности, это относится к изменениям давления, температуры, плотности воздуха и скорости ветра в приземном слое

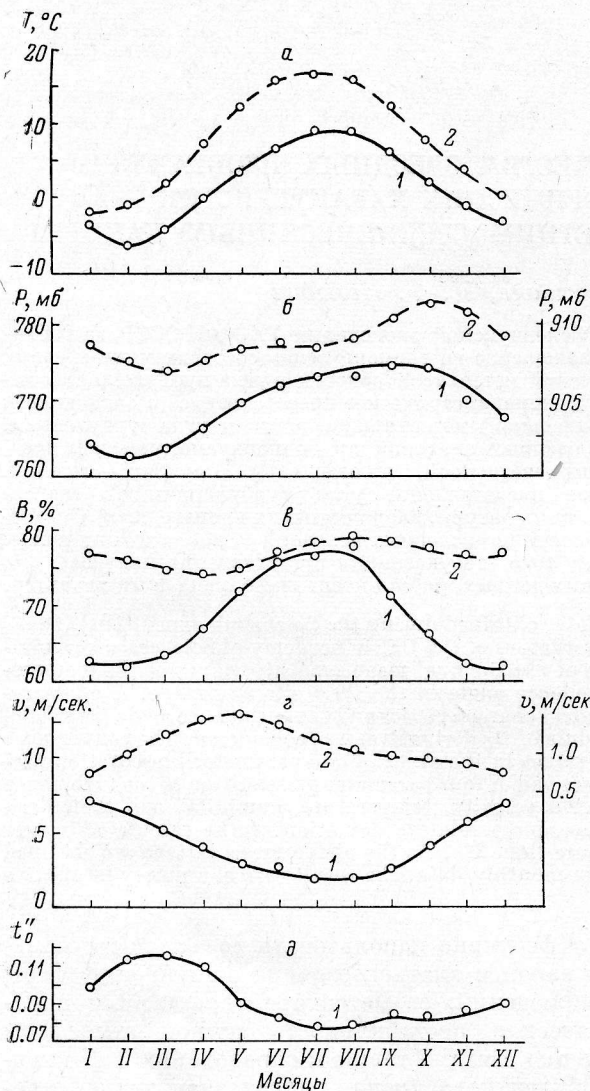


Рис. 1. Сравнение кривых, полученных по формуле (1), с наблюдаемыми значениями.

a — температура воздуха; *b* — давление воздуха; *v* — влажность воздуха; *g* — скорость ветра; *d* — угол турбулентности. 1 — пос. Звездный, 2 — ст. Зеленчукская (в *b* и *g* левая шкала для пос. Звездный, правая — для ст. Зеленчукской).

[1—3 и др.]. Однако наличие сезонных (6-месячных) вариаций температуры проявляется лишь в экваториальных областях [1]. Ввиду того что средние многолетние кривые среднемесячных значений любой из указанных метеохарактеристик и угла турбулентности являются строго периодическими с периодом в один год, могут быть найдены также и другие гармонические составляющие с частотами, кратными 1 год^{-1} , для температуры (T , °C), давления (P , мб), относительной влажности (B , %) и скорости ветра (v , м/сек.) в приземном слое, а также для угла турбулентности в зените (t''_0).

Для этой цели были использованы материалы наблюдений угла турбулентности в зените и метеорологических характеристик по программе метеостанции III класса, полученные Зеленчукской экспедицией ГАО АН СССР в 1961—1966 гг. в районе установки БТА (пос. Звездный), а также материалы наблюдений метеостанции II класса Северо-Кавказского УГМС в ст. Зеленчукской Ставропольского края за тот же период. Методика наблюдений и некоторые результаты обработки частично были изложены в работах [4, 5].

Значения средних многолетних среднемесячных величин метеорологических характеристик и угла турбулентности были подвергнуты разложению в ряд Фурье

$$Q_n(x) = \frac{a_0^n}{2} + \sum_{k=1}^K a_k^n \cos k \frac{2\pi}{\tau} x + \sum_{k=1}^K b_k^n \sin k \frac{2\pi}{\tau} x. \quad (1)$$

Вычисления выполнялись до $K=4$. В формуле (1) τ бралось равным 12 месяцам, $x=1, 2, \dots, 12$ — месяцы, $Q_n=T, P, B, v$ и t_0'' — 3-месячные скользящие средние указанных величин. Скользящие средние взяты ввиду того, что наблюдения качества звездных изображений, несмотря на пятилетний период наблюдений, в отдельные месяцы оказываются недостаточно многочисленными [4].

ТАБЛИЦА 1

Метео-характеристика и t_0''	k	Место установки БТА (пос. Звездный)		ст. Зеленчукская	
		q_k^n	φ_k^n	q_k^n	φ_k^n
T	1	7.52	77°48'	9.25	87°20'
	2	0.38	90°00'	0.30	— 3°11'
	3	0.47	4°05'	0.71	—72°04'
	4	0.12	—90°00'	0.03	58°00'
P	1	5.77	51°41'	1.87	1°53'
	2	0.95	45°51'	0.81	55°25'
	3	0.45	49°38'	0.27	29°02'
	4	0.50	—34°41'	0.06	—35°12'
B	1	8.03	—88°06'	1.56	15°21'
	2	1.62	71°42'	0.82	61°30'
	3	0.97	—45°41'	0.17	78°41'
	4	0.29	1°38'	0.05	90°00'
v	1	2.52	87°47'	0.32	—37°51'
	2	0.42	—47°42'	0.11	82°59'
	3	0.11	—25°48'	0.01	26°34'
	4	0.02	69°24'	0.01	68°12'
t_0''	1	0.017	46°26'	—	—
	2	0.007	—29°16'	—	—
	3	0.001	—90°00'	—	—
	4	0.001	90°00'	—	—

Коэффициенты разложения (1) находились по известным формулам

$$a_0^n = 2 \overline{Q_n(x)},$$

$$a_k^n = \sum_{x=1}^{12} Q_n(x) \cos k \frac{2\pi}{\tau} x,$$

$$b_k^n = \sum_{x=1}^{12} Q_n(x) \sin k \frac{2\pi}{\tau} x.$$

Формула (1) может быть также записана в виде

$$Q_n(x) = q_0^n + \sum_{k=1}^4 q_k^n \sin \left(k \frac{2\pi}{\tau} x + \varphi_k^n \right), \quad (2)$$

где

$$q_0^n = \frac{a_0^n}{2}, \quad q_k^n = \sqrt{(a_k^n)^2 + (b_k^n)^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi_k^n = \frac{a_k^n}{b_k^n}.$$

Найденные коэффициенты q_k^n и фазы φ_k^n разложений приведены в табл. 1, из рассмотрения которой видно, что

$$q_1 \gg q_2, q_3 \text{ и } q_4 \text{ для } T,$$

$$q_1, q_2 \gg q_3, q_4 \text{ для } P, B, v \text{ и } t_0''$$

как для пос. Звездный, так и для ст. Зеленчукской. На рис. 1 показано сравнение кривых, полученных по формуле (1), с данными наблюдений.

§ 2. ПОСТРОЕНИЕ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ДЛЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И УГЛА ТУРБУЛЕНЦИИ

Учитывая то обстоятельство, что каждая из метеорологических характеристик (в частности, и угол турбулентции) есть суперпозиция в основном двух гармонических колебаний с периодами в 12 и 6 месяцев (за исключением T °C), попытаемся аппроксимировать ход каждой отдельной метеохарактеристики формулой, зависящей от одного естественного параметра.

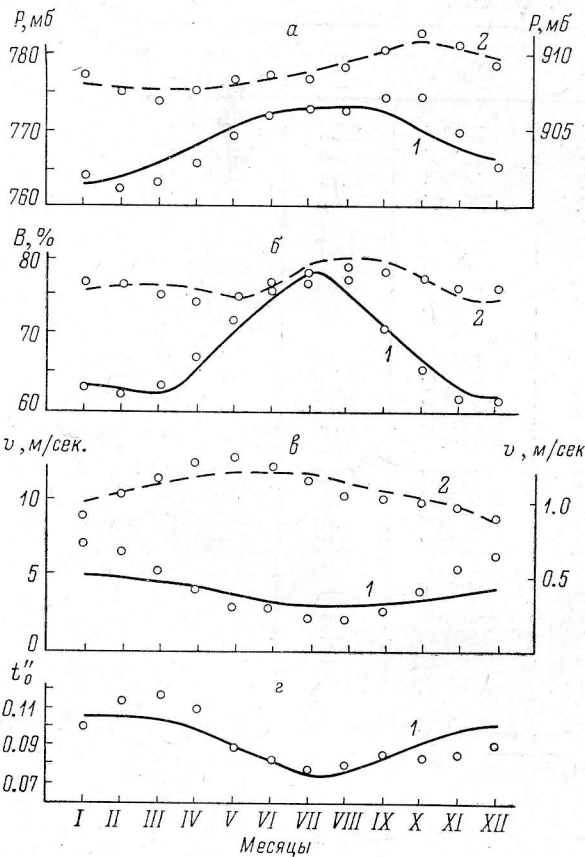


Рис. 2. Аппроксимация поведения метеохарактеристик формулой (3).

a — давление воздуха; b — влажность воздуха; v — скорость ветра; t''_0 — угол турбулентции. 1 — пос. Звездный, 2 — ст. Зеленчукская (в a и v левая шкала для пос. Звездный, правая — для ст. Зеленчукской).

Здесь $Q_m = P, B, v$ и t''_0 ,

$$T(x) = T_0 + T_1 \sin\left(\frac{2\pi}{12}x + \varphi_T\right),$$

$$\left|\frac{dT(x)}{dx}\right| = \frac{\pi}{6} T_1 \left|\cos\left(\frac{2\pi}{12}x + \varphi_T\right)\right|, \quad (3')$$

где φ_T — начальная фаза для температуры.

Коэффициенты q_0^m , q_1^m и q_2^m для каждой метеохарактеристики находились способом наименьших квадратов. Рассчитанные с помощью этих коэффициентов кривые для каждой из метеохарактеристик представлены на рис. 2.

В качестве такого параметра была выбрана температура воздуха, поскольку только температура имеет практически чисто синусоидальную годовую волну (амплитуда годовой волны существенно больше амплитуд 6-, 4- и 3-месячных периодов) и поскольку из общих соображений следует, что лучистое нагревание атмосферы, а следовательно, и ее температура можно считать наименее зависимым и наиболее существенным параметром, влияющим на изменение состояния земной атмосферы.

Исходя из вышеизложенного, введем следующее представление:

$$Q_m(x) = q_0^m + q_1^m T(x) + q_2^m \left|\frac{dT(x)}{dx}\right|. \quad (3)$$

Из рис. 2 видно, что однопараметрическое представление приведенных метеохарактеристик и угла турбуленции позволяет аппроксимировать достаточно хорошо лишь общие закономерности изменений этих характеристик атмосферы.

§ 3. ПОЛУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УГЛА ТУРБУЛЕНЦИИ КАЧЕСТВА ЗВЕЗДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТ МЕТЕОХАРАКТЕРИСТИК

В предыдущем параграфе мы рассмотрели зависимость вида (3), в которой значения производных вычислялись по формуле (3'). В общем случае, когда мы имеем эмпирический ряд метеохарактеристик, должен быть применен метод дифференцирования эмпирически заданной функции, описанный в [6 и др.]. Применяя этот метод, соответствующие производные вычисляем по формулам

$$\frac{dQ(x)}{dx} = \frac{-2Q(x-2) - Q(x-1) + Q(x+1) + 2Q(x+2)}{10}. \quad (4)$$

Производные первых двух значений ряда таковы:

$$\begin{aligned} \frac{dQ(1)}{dx} &= \frac{-21Q(1) + 13Q(2) + 17Q(3) - 9Q(4)}{20}, \\ \frac{dQ(2)}{dx} &= \frac{-11Q(1) + 3Q(2) + 7Q(3) + Q(4)}{20}. \end{aligned} \quad (4')$$

Для последних двух точек ряда формулы те же, только нумерация точек идет с конца, т. е. $Q(1) \rightarrow Q(N)$, $Q(2) \rightarrow Q(N-1)$ и т. д. Для угла турбуленции t_0'' просчитывались следующие представления:

$$\begin{aligned} t_0'' &= t_0 + t_1(Q_j - \bar{Q}_j) + t_2 \left| \frac{dQ_j}{dx} \right|, \\ t_0'' &= t_0 + t_1(Q_j - \bar{Q}_j) + t_2(Q_i - \bar{Q}_i) \text{ и др.} \end{aligned} \quad (5)$$

и наконец

$$t_0'' = t_0 + \sum_{j=1}^4 t_j(Q_j - \bar{Q}_j) \quad (6)$$

и

$$t_0'' = t_0 + \sum_{j=1}^4 t_j(Q_j - \bar{Q}_j) + \sum_{j=1}^4 t'_j \left| \frac{dQ_j}{dx} \right|. \quad (7)$$

Здесь $Q_j = T, P, B$ и v .

Оказалось, что формулы вида (5) представляют наблюдения недостаточно удовлетворительно. В формуле (7) величины коэффициентов t_j и t'_j вычислялись (способом наименьших квадратов) на ЭЦВМ «Минск-22». Значения этих коэффициентов приведены в табл. 2, где также даны величины

$$\eta_j = \frac{t_j(Q_j^{\max} - Q_j^{\min})}{t_0''^{\max} - t_0''^{\min}}, \quad \eta'_j = \frac{t'_j \left(\left| \frac{dQ_j}{dx} \right|^{\max} - \left| \frac{dQ_j}{dx} \right|^{\min} \right)}{t_0''^{\max} - t_0''^{\min}}, \quad (8)$$

характеризующие вклад отдельных метеохарактеристик и их производных в вычисляемые значения t_0'' .

Рассчитанные по формулам (6) и (7) кривые приведены на рис. 3. Как видим, согласие между вычисленными и наблюдаемыми значениями

t_0'' хорошее. Относительное среднеквадратичное отклонение наблюдаемых значений от вычисленных по формуле (7), определяемое по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^{12} \left(1 - \frac{t_0''(x)_{\text{вмч}}}{t_0''(x)_{\text{набл}}}\right)^2}{12}}, \quad (9)$$

составляет лишь 0.019, т. е. около 2%.

ТАБЛИЦА 2

Метеохарактеристика	Амплитуда		«Значимость»	
	t_j	t'_j	η_j	η'_j
P	-0.00358	-0.0019	0.78	0.30
v	-0.00590	+0.0142	0.52	0.10
T	-0.00062	-0.0039	0.15	0.05
B	-0.00035	+0.0020	0.10	0.03

В заключение следует отметить, что настоящая работа носит лишь оценочный характер. Полученные результаты показывают, что однопараметрическое представление как угла турбулентности, так и различных метеорологических характеристик в зависимости от изменений температуры воздуха в приземном слое атмосферы и ее производной может лишь в общих чертах объяснить наблюдаемые закономерности.

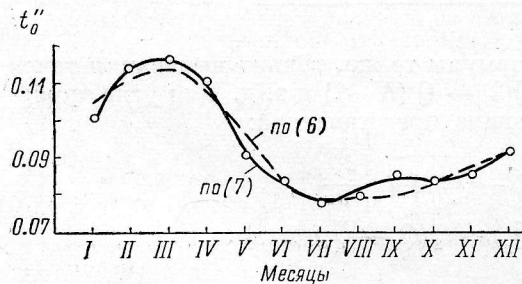


Рис. 3. Сравнение вычисленных значений t_0'' по формулам (6) и (7) с наблюдаемыми величинами.

Представление же угла турбулентности как линейной комбинации всех наблюдаемых метеохарактеристик позволяет получить удовлетворительное согласие расчетов с наблюдениями для средних многолетних среднемесячных значений указанных параметров. Это, в свою очередь, дает повод предполагать, что полный дисперсионный спектральный анализ всего ряда имеющихся наблюдений позволит выявить связь между метеохарактеристиками места и качеством астрономических изображений и найти соответствующие количественные соотношения.

Литература

1. В. И. Бышев, Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 4, № 5, 540, 1968.
2. С. М. Простяков, Тр. НИИАК, вып. 41, 3, 1968.
3. М. Г. Крошкин, Сб. Геофизика 66, М., 1968, стр. 22.
4. О. Б. Васильев, Н. Ф. Нелюбин, Астрофиз. иссл. (Изв. САО), 1, 125, 1969.
5. О. Б. Васильев, Н. Ф. Нелюбин, Сообщ. САО АН СССР, № 1, 1968.
6. К. Ланцош. Практические методы прикладного анализа. Физматгиз, 1961, стр. 327—329.

Январь 1969 г.