

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В МЕСТЕ УСТАНОВКИ БТА

(по материалам Зеленчукской экспедиции ГАО АН СССР
за 1960—1966 гг.)

О. Б. Васильев, Н. Ф. Нелюбин

Зеленчукской экспедицией ГАО АН СССР в 1960—1966 гг. были проведены наблюдения качества астрономических изображений в районе установки БТА. Качество изображений оценивалось по 5-балльной шкале Данжона—Кудера, затем пересчитывалось в углы турбуленции t_z'' . Наблюденные значения t_z'' хорошо удовлетворяются формулой

$$t_z'' = t_0'' + k \operatorname{tg} z.$$

В работе исследуются изменения качества изображений в месте установки БТА в зависимости от азимута, срока и месяца наблюдений. Выявлены 6- и 12-месячные периодичности в качестве изображений. Подобрана эмпирическая формула для указанной периодичности (8).

Проведена также статистическая обработка метеорологических наблюдений в районе установки БТА. Отчетливой корреляции качества изображений с метеохарактеристиками района не обнаружено.

The Zelenchuk expedition of the Main Astronomical Observatory of the USSR Academy of Sciences investigated the seeing at the BTA site during 1960—1966. The seeing was estimated according to the 5-mark Danjon—Couder scale, then it was recalculated into the turbulence angles t_z'' . The observed values of t_z'' comply the formula

$$t_z'' = t_0'' + k \operatorname{tg} z.$$

Variations of the seeing at the BTA site are investigated as a function of the azimuth, time, and month of observations. The 6- and the 12-months periodicities in the seeing are discovered. An empirical formula for the above periodicities is derived.

A statistical reduction of meteorological observations at the BTA site was made as well. No distinct correlation between the seeing and meteorological features of the region was detected.

В 1960—1966 гг. Зеленчукской экспедицией ГАО АН СССР на телескопе АЗТ-7 (диаметр зеркала 20 см) проводились наблюдения степени размытости дифракционной картины звезд («качества изображений») в ст. Зеленчукской (с июля 1960 по апрель 1961 г.) и в пункте Семиродники Зеленчукского района на высоте 2280 м над уровнем моря (с мая 1961 по август 1966 г.). В наблюдениях принимало участие большое число сотрудников различных отделов ГАО АН СССР. Выполненные наблюдения позволили достаточно определенно выбрать место для установки БТА.

Работы, выполненные Зеленчукской экспедицией ГАО АН СССР, дают также многолетний ряд наблюдений, который может быть использован для статистической обработки: определения зависимости угла

турбуленции от зенитного расстояния, выявления периодичностей изменений «качества изображений», нахождения связи между астроклиматическими и метеорологическими элементами, а также для получения средних многолетних астроклиматических характеристик места установки БТА. Рассмотрению перечисленных задач и посвящена настоящая работа.

§ 1. О ЗАВИСИМОСТИ «КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ» ОТ ЗЕНИТНОГО РАССТОЯНИЯ

Как известно, качество астрономических изображений оценивается по виду дифракционной картины звезд и характеризуется углом турбуленции, переход к которому осуществляется по формуле Данжона—Кудера [1]

$$t_z'' = \frac{13.96}{D} 2^{M-4}, \quad (1)$$

где t_z'' — угол турбуленции на зенитном расстоянии z , D — диаметр объектива в см, M — качество изображений в баллах шкалы Данжона—Кудера. Углы турбуленции, определенные из наблюдений на разных зенитных расстояниях, естественно, не могут характеризовать астрономических условий места наблюдения. Для сравнения отдельных пунктов наблюдений необходимо углы турбуленции на разных зенитных расстояниях привести к зениту, для чего необходимо знание закона, по которому изменяется t_z'' в зависимости от z . Данжоном и Кудером была предложена [1] формула

$$t_z'' = t_0'' \sec z. \quad (2)$$

Однако рассмотрение многочисленных материалов, полученных в Зеленчукской экспедиции ГАО АН СССР в 1960—1966 гг., показало, что этот закон не выполняется: вычисленное по формуле (2) значение угла турбуленции в зените t_0'' оказывается всегда примерно на 15—20% больше фактически наблюдаемого угла турбуленции на зенитном расстоянии $z=20^\circ$.

Зависимость дрожания звезд от зенитного расстояния исследовалась многократно. Подробный обзор по этому вопросу содержится в работе Колчинского [2, стр. 76—88]. Из этого обзора видно, что до настоящего времени у различных авторов нет единого мнения о виде зависимости величин дрожания от зенитного расстояния, более того, эта зависимость оказывается различной у одних и тех же авторов для одного и того же места, но для разных периодов наблюдений, к тому же формулы, как правило, не удовлетворяют всему интервалу z .

Подробное исследование зависимости качества изображений звезд от зенитного расстояния никем не проводилось. Поэтому при обработке материалов по наблюдениям качества изображений звезд в пункте Семинородники Зеленчукского района мы отказались от априорной пропорциональности угла турбуленции секансу зенитного расстояния. Проверялись двухпараметрические зависимости угла турбуленции от зенитного расстояния следующих видов:

$$t_z'' = t_0'' \sec^\alpha z, \quad (3)$$

$$t_z'' = t_0'' + k \sec z, \quad (4)$$

$$t_z'' = t_0'' \operatorname{tg}^\beta z, \quad (5)$$

$$t_z'' = t_0'' + k \operatorname{tg} z. \quad (6)$$

Обработка многочисленных материалов Зеленчукской экспедиции ГАО АН СССР за 1960—1966 гг. показала, что зависимость угла турбу-

ленции t''_z от зенитного расстояния звезды вида (3), (4) или (5) явно не удовлетворяет наблюдениям, а зависимость вида (6) удовлетворяет (рис. 1). Аналогичная зависимость величины дрожания от зенитного расстояния получена в [3—6]. Рассмотрение рис. 1, з, на котором построена зависимость t''_z от $\lg z$, показывает, что точки наблюдений достаточно хорошо ложатся на прямую. Наблюдаемое отклонение точек от прямой на z , близких к 0° , и на больших z можно объяснить несовершенством метода Данжона—Кудера, а именно: пятибалльная шкала, естественно, будет завышать значения t''_z при малых z , поскольку чем ближе к зениту,

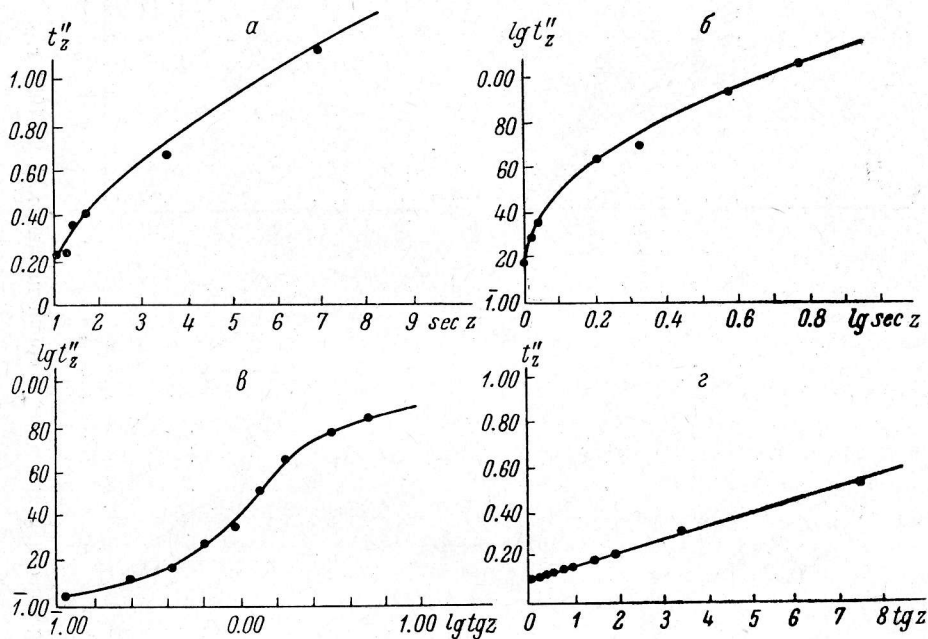


Рис. 1. Определение зависимости угла турбуленции t''_z от зенитного расстояния.

$$a - t''_z = t''_0 + k \sec z, \quad б - t''_z = t''_0 \sec^2 z, \quad в - t''_z = t''_0 \lg^2 z, \quad г - t''_z = t''_0 + k \lg z.$$

тем меньше должен быть угол турбуленции, а шкала Данжона—Кудера не позволяет оценить качество изображений звезд точнее, чем в 1 балл, и, наоборот, при больших z мы не имеем возможности точно оценить плохие изображения, которые, естественно, ухудшаются с увеличением z , но шкала ограничена баллом 5. График подтверждает вышеизложенное: при малых z имеем уклонение точек вверх от прямой, а при больших z — уклонение вниз.

Для определения зависимости t''_z от z производилось разбиение значений t''_z на зоны, соответствующие интервалу по z в 10° ($0-9^\circ$, $10-19^\circ$ и т. д.); внутри каждой зоны производилось усреднение всех t''_z , предварительно вычисленных по оценкам качества изображений по шкале Данжона—Кудера в соответствии с формулой (1). Усреднялись наблюдения по годам и отдельно по каждому азимуту. Параметры формулы (6), определявшиеся по способу наименьших квадратов по годам и азимутам, приведены в табл. 1.

После того как была найдена зависимость t''_z от z , все наблюдения Зеленчукской экспедиции ГАО АН СССР были заново обработаны. Усреднение производилось по срокам наблюдений. Всего было построено свыше 1600 графиков. На рис. 2 представлены некоторые из них. Из рассмотре-

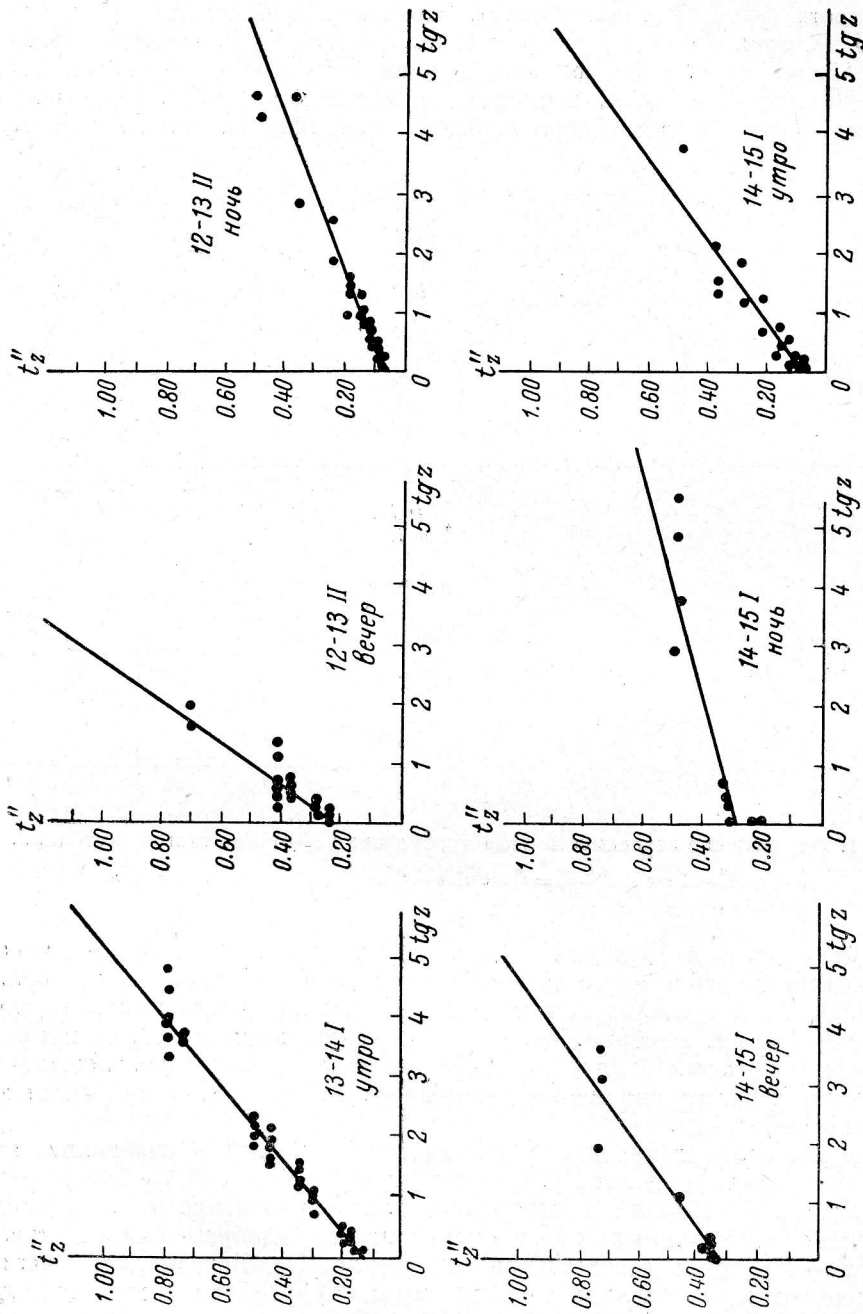


Рис. 2. Зависимость t_z'' от tgz в отдельные даты и сроки наблюдений за 1961 г.

ТАБЛИЦА 1

Азимут	Параметры формулы	1960 г.	1961 г.	1962 г.	1963 г.	1964 г.	1965 г.	1966 г.
Север	\bar{t}_0''	0'16	0'10	0'08	0'13	0'13	0'06	0'09
	\bar{k}	0.16	0.17	0.17	0.19	0.17	0.18	0.12
Запад	\bar{t}_0''	0.19	0.10	0.13	0.12	0.10	0.05	0.03
	\bar{k}	0.16	0.18	0.11	0.21	0.21	0.19	0.16
Юг	\bar{t}_0''	0.21	0.11	0.10	0.16	0.11	0.04	0.08
	\bar{k}	0.16	0.19	0.13	0.17	0.20	0.22	0.11
Восток	\bar{t}_0''	0.19	0.11	0.11	0.15	0.10	0.08	0.04
	\bar{k}	0.16	0.18	0.14	0.17	0.21	0.17	0.20
В среднем по всем азимутам	\bar{t}_0''	0.20	0.10	0.09	0.13	0.11	0.06	0.08
	\bar{k}	0.16	0.18	0.16	0.20	0.20	0.19	0.13

Примечание. Данные до мая 1961 г. относятся к пункту наблюдения ст. Зеленчукская.

ния этого рисунка видно, что даже в отдельные сроки, где число наблюдений невелико, формула (6) достаточно хорошо отражает зависимость t_z'' от зенитного расстояния, тем более что сам метод определения качества изображений звезд обладает большой субъективной ошибкой. Несмотря на это, значения t_0'' и k , определенные таким образом, имеют собственную ошибку, по-видимому не превосходящую 20%. В табл. 2 приведены усредненные по месяцам t_0'' и k (сравнение последних строчек этой таблицы с данными последних строчек табл. 1 показывает хорошее согласие).

§ 2. ЗАВИСИМОСТЬ «КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ» ОТ АЗИМУТА, СРОКА И СЕЗОНА НАБЛЮДЕНИЙ В МЕСТЕ УСТАНОВКИ БТА

В процессе обработки наблюдений производилось также усреднение t_0'' по азимутам. Полученные значения \bar{t}_0'' за каждый год позволили выявить зависимость \bar{t}_0'' от азимута наблюдений (рис. 3). Оказалось, что качество изображений наилучшее в западном направлении, а различие между худшим азимутом (юг) и наилучшим — порядка 1.5 раз (табл. 3 и рис. 3).

Кроме того, определялось наиболее благоприятное время наблюдений на протяжении ночи по срокам: I срок — спустя час после захода Солнца, II срок — 1 час ночи и III срок — за час до восхода Солнца. Систематических различий в качестве изображений по срокам не наблюдается, но

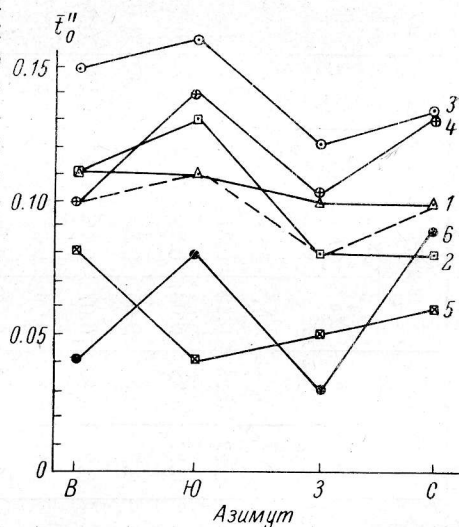


Рис. 3. Изменение \bar{t}_0'' по азимутам за период 1961—1966 гг.

1 — 1961 г.; 2 — 1962 г.; 3 — 1963 г.;
4 — 1964 г.; 5 — 1965 г.; 6 — 1966 г.;
пунктир — средние за все годы.

ТАБЛИЦА 2

Месяцы	1960 г.		1961 г.		1962 г.		1963 г.		1964 г.		1965 г.		1966 г.		Среднее за все годы	
	\bar{t}''_0	k	\bar{t}''_0	k	\bar{t}''_0	k	\bar{t}''_0	k	\bar{t}''_0	k	\bar{t}''_0	k	\bar{t}''_0	k	\bar{t}''_0	k
Январь	—	—	0.22	0.23	0.12	0.31	0.15	0.21	0.12	0.23	0.12	0.20	0.02	0.13	0.106	0.23
Февраль	—	—	0.27	0.28	0.08	0.20	0.14	0.27	0.13	0.20	0.08	0.25	—	—	0.108	0.23
Март	—	—	0.25	0.35	0.05	0.26	0.29	0.36	0.10	0.28	0.08	0.25	0.16	0.30	0.136	0.29
Апрель	—	—	0.24	0.22	0.07	0.16	0.21	0.26	0.09	0.23	—	—	0.07	0.05	0.110	0.18
Май	—	—	0.11	0.16	0.09	0.20	0.14	0.23	0.14	0.23	0.06	0.30	0.05	0.10	0.098	0.20
Июнь	—	—	0.08	0.22	0.06	0.17	0.10	0.20	0.11	0.20	0.06	0.19	0.07	0.11	0.080	0.18
Июль	0.26	0.09	0.07	0.18	0.09	0.15	0.08	0.22	0.09	0.19	0.05	0.12	0.05	0.15	0.071	0.17
Август	0.17	0.17	0.09	0.15	0.06	0.11	0.12	0.19	0.13	0.25	0.04	0.13	0.06	0.14	0.083	0.16
Сентябрь	0.14	0.20	0.06	0.15	0.07	0.16	0.08	0.16	0.10	0.17	0.05	0.15	—	—	0.072	0.16
Октябрь	0.14	0.18	0.14	0.16	0.09	0.12	0.10	0.19	0.06	0.13	0.08	0.24	—	—	0.094	0.17
Ноябрь	—	—	0.12	0.22	0.04	0.09	0.08	0.18	0.12	0.26	0.06	0.22	—	—	0.084	0.19
Декабрь	0.36	0.34	0.14	0.20	0.03	0.19	0.13	0.17	0.09	0.20	0.03	0.17	—	—	0.084	0.19
Среднее за год	0.19	0.16	0.10*	0.19*	0.08	0.16	0.12	0.20	0.10	0.21	0.06	0.18	0.07	0.14		

* Усреднение \bar{t}''_0 и k за 1961 г. производилось с мая, так как до этого наблюдения велись в ст. Зеленчукской.

в среднем происходит улучшение качества изображений от вечера к утру примерно на 10% (рис. 4). Численные значения \bar{t}_0'' по срокам приведены в табл. 4.

И, наконец, с целью выявления периодичности в изменении t_0'' определялись изменения качества изображений от месяца к месяцу, для этого производилось усреднение t_0'' в каждый месяц за все годы (табл. 2). Из рассмотрения рис. 5, где приведена кривая изменения t_0'' по месяцам, видно, что наилучшие качества изображений приходятся на летне-осенние месяцы и худшие — на февраль—март.

§ 3. ПЕРИОДИЧНОСТЬ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Вопрос о периодичности качества изображений звезд интересен не только с теоретической точки зрения, но имеет и практическое значение для эффективного использования телескопов различных размеров и, в особенности, инструментов большого диаметра.

В предположении о случайном стационарном характере качества изображений [2] была вычислена автокорреляционная функция $\rho(\tau)$ полученного ряда наблюдений. При вычислении $\rho(\tau)$ брались 3-месячные скользящие средние значения \bar{t}_0'' . Автокорреляционная функция вычислялась по 62 точкам, наибольший сдвиг был не больше 48 месяцев. Функция $\rho(\tau)$, представляющая этот ряд, приведена на рис. 6. По автокорреляционной функции сделать вывод о наличии какой-либо периодичности довольно

ТАБЛИЦА 3

Год	Азимут			
	восток	юг	запад	север
1961	0'11	0'11	0'10	0'10
1962	0.11	0.13	0.08	0.08
1963	0.15	0.16	0.12	0.13
1964	0.10	0.14	0.10	0.13
1965	0.08	0.04	0.05	0.06
1966	0.04	0.08	0.03	0.09
Среднее	0'098	0'110	0'080	0'098

ТАБЛИЦА 4

Сроки	1960 г.	1961 г.	1962 г.	1963 г.	1964 г.	1965 г.	1966 г.	Среднее
Вечер (I)	0'19	0'20	0'07	0'11	0'10	0'06	0'06	0'113
Ночь (II)	0.18	0.16	0.07	0.12	0.10	0.05	0.06	0.106
Утро (III)	0.16	0.16	0.07	0.11	0.09	0.05	0.07	0.101

трудно, хотя имеется отчетливо выраженный максимум на 36 месяцах и менее четкие на 15 и 9 месяцах.

Для того чтобы сделать окончательный вывод о периодичности t_0'' , $\rho(\tau)$ была подвергнута Фурье-преобразованию в соответствии с формулой, полученной в работе [7]

$$G(P) = \frac{1}{N+1} \sum_{\tau=0}^N \rho(\tau) \cos \frac{2\pi}{P} \tau. \quad (7)$$

Здесь $\rho(\tau)$ — автокорреляционная функция, построенная на основе 3-месячного сглаженного ряда \bar{t}_0'' ; P — период; τ — номер члена ряда наблюдений; $N+1$ — число членов. Формула (7) дает энергетический спектр для \bar{t}_0'' . На рис. 7 приведена гистограмма, характеризующая спектральную плотность ряда наблюдений \bar{t}_0'' . Спектр имеет максимумы на 6, 9,

12—13, 18, 36—39-м месяцах. Наличие периодов в 6 и 12 месяцев легко объяснимо, так как они соответствуют сезонной и годичной периодичности. Что касается других периодов, то они либо являются «боковыми полосами» основных линий (см. ниже вывод), либо соответствуют каким-то долго-

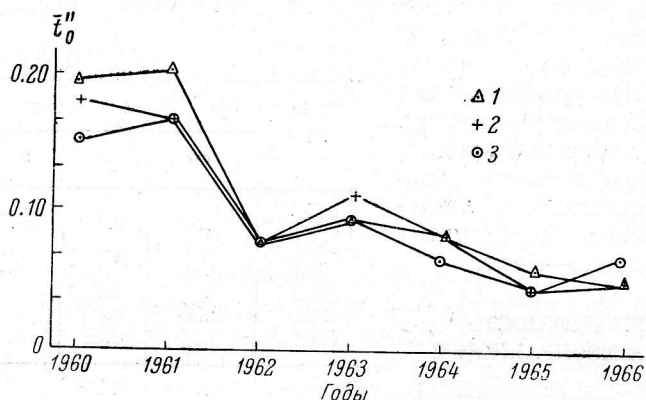


Рис. 4. Изменение t''_0 по срокам наблюдений в период 1960—1966 гг.

1 — I срок; 2 — II срок; 3 — III срок.

периодическим колебаниям общей циркуляции атмосферы. Можно предположить, что в осенние и весенние месяцы будет происходить ухудшение, а в летние и зимние — улучшение качества изображений, что будет определяться устойчивостью общего состояния земной атмосферы (погоды).

Основные периоды . . . 6 и 12 12 и 36 6 и 36
«Боковые полосы» . . . 4 и 12 9 и 18 5 и 7

Сходные сезонные изменения t''_0 отмечены при изучении астроклимата в Новосибирске [11]. Наличие периодов, больших года, отмечается в работах [8—10], а именно: 18, 26,

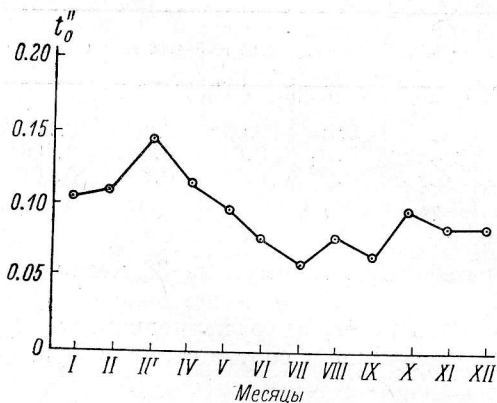


Рис. 5. Изменение t''_0 по месяцам в среднем за все годы (1961—1966 гг.).

32, 39 и 40-месячные периоды изменения температуры, ветра и количества озона в стратосфере Земли, однако нет достаточных оснований утверждать, что чисто периодические процессы играют значительную роль в общей циркуляции атмосферы и косвенным образом сказываются на качестве изображений.

Принимая найденные выше периоды изменения t''_0 в 6 и 12 месяцев, попытаемся подобрать формулу для изменения качества изображений в течение года. Рассмотрим формулу вида

$$t'' = t_0 + t_1 \sin\left(\frac{2\pi}{12} T + T_1\right) + t_2 \sin\left(\frac{2\pi}{6} T + T_2\right), \quad (8)$$

где t_1 и t_2 — амплитуды, T_1 и T_2 — начальные фазы 6- и 12-месячных колебаний, t_0 — среднее значение угла турбуленции за все годы. Для средних данных за весь период наблюдений получаем 12 уравнений с пятью неиз-

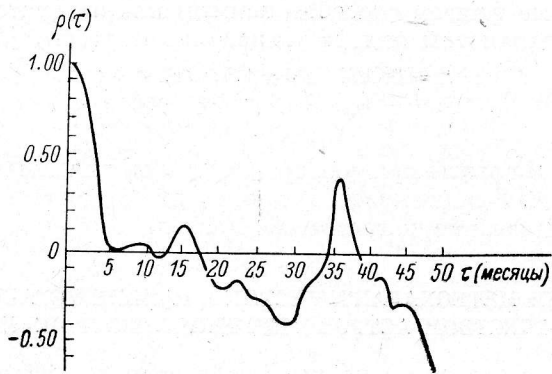


Рис. 6. Автокорреляционная функция $\rho(\tau)$ ряда наблюдений t''_0 .

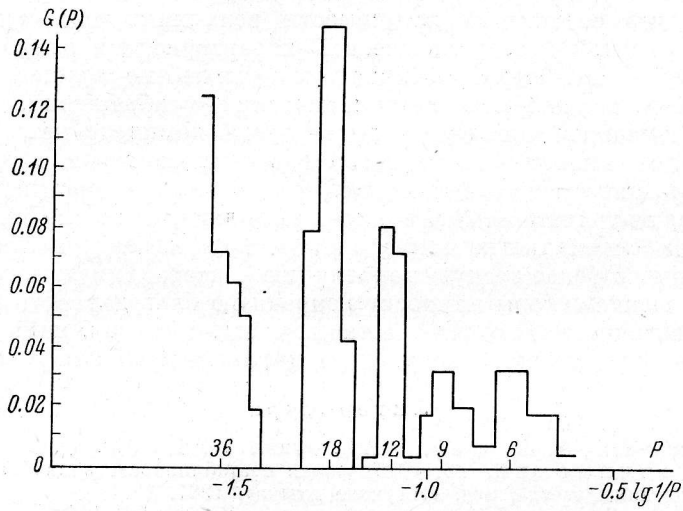


Рис. 7. Энергетический спектр $G(P)$ ряда наблюдений t''_0 .

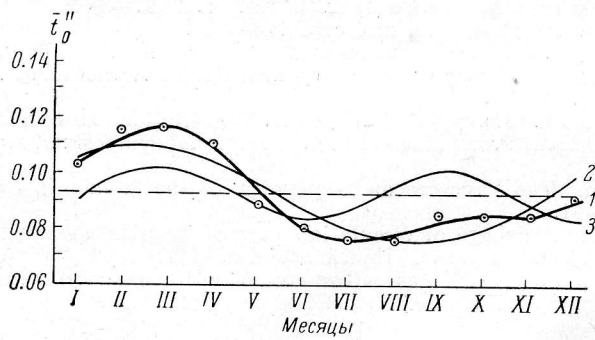


Рис. 8. Сравнение наблюдаемых и вычисленных значений t''_0 .

1 — кривая, построенная по формуле (8); 2 и 3 — 12- и 6-месячные периоды изменения t''_0 ; точки — наблюдаемые значения, пунктирная линия — среднее значение t''_0 .

вестными, которые решаем способом наименьших квадратов, в результате чего получаем параметры интересующей нас формулы (8)

$$\begin{aligned}t_0 &= 0.093, & T_1 &= 1.5 \text{ мес.}, \\t_1 &= 0.017, & T_2 &= -0.5 \text{ мес.}, \\t_2 &= 0.007,\end{aligned}$$

Строя по этой формуле кривую, сравниваем ее с наблюдениями (рис. 8). Рассмотрение рис. 8 показывает, что формула (8) достаточно хорошо аппроксимирует изменение качества изображений.

§ 4. О СВЯЗИ МЕТЕОХАРАКТЕРИСТИК В РАЙОНЕ УСТАНОВКИ БТА С «КАЧЕСТВОМ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ»

С целью сопоставления качества изображений с метеорологическими характеристиками района установки БТА были подвергнуты статистической обработке ряды наблюдений стандартных метеорологических элементов за 1961—1966 гг. Полученные коэффициенты корреляции показывают, что отчетливой зависимости величины угла турбуленции от отдельно взятой метеорологической характеристики данного района, по-видимому, нет. Оценка облачности также не влияет существенным образом на качество астрономических изображений. Вероятно, на качество изображений звезд влияет целый комплекс метеохарактеристик, а также синоптических и географических факторов. В дальнейшем зависимость качества изображений от метеохарактеристик, очевидно, следует рассматривать в более широком плане, а также организовать наблюдения специальных метеорологических характеристик, которые могли бы иметь более тесную корреляцию с астроклиматом.

В заключение авторы приносят искреннюю благодарность всем участникам проведения наблюдений, а также канд. физ.-мат. наук С. В. Рублеву за ряд советов при выполнении настоящей работы.

Литература

1. А. Данжон, А. Кудер, Астр. журн., 17, 1, 1940.
2. И. Г. Колчинский, сб. «Оптическая нестабильность земной атмосферы по наблюдениям звезд», изд. «Наукова думка», 1967.
3. E. W a h l, Gerlands Beiträge zur Geophysik, 59, 1, 56, 1942.
4. О. Б. Васильев, сб. «Оптическая нестабильность земной атмосферы», изд. «Наука», стр. 40—48, 1965.
5. О. П. Васильяновская, там же, стр. 97—106.
6. Н. М. Бронников, там же, стр. 116—121.
7. О. Б. Васильев, Астрофизические исследования серебристых облаков, Информационное сообщение рабочей группы ОНЗА Астросовета АН СССР, № 4, 1—84, 1967.
8. W. L. G o d s o n. Long-period atmospheric oscillations as components of the general circulation, Proceedings of the international symposium, Moscow, pp. 388—392, 1965.
9. R. J. R e e d. The structure and dynamics of the 26-month oscillation. Ibid., pp. 393—401.
10. W. B ö h m e. A change of circulation pattern in middle latitudes in circulation with the 26-month cycle. Ibid., pp. 402—409.
11. А. Д. Скоропупов, сб. «Оптическая нестабильность земной атмосферы», изд. «Наука», стр. 122—137, 1965.