

(с учетом весов), существенно уменьшится. Возникает вопрос, как изменяется разности

$$\Delta\delta_1 = \delta_F - \delta_{FK3R}$$

которые приведены в Голосеевском каталоге, если вместо δ_F взять новые оценки $\bar{\delta}$,

$$\Delta\delta_2 = \bar{\delta} - \delta_{FK3R}$$

Мы нашли следующие значения дисперсий:

$$D\{\Delta\delta_1\} = 0''.02740, \quad D\{\Delta\delta_2\} = 0''.02663.$$

Как видно, применение наиболее вероятных оценок незначительно уменьшает дисперсию ошибок наблюдений, найденную по внешней сходимости. Значения $\Delta\delta_1$ и $\Delta\delta_2$ отличаются друг от друга незначительно. Только в случае малого количества наблюдений эти отличия достигают до $0''.06 - 0''.08$.

Наконец, важным преимуществом изложенного метода является использование всех имеющихся наблюдений без каких-либо критериев отбрасывания резко выделяющихся значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харин А. С. — Каталог склонений звезд программ зенит-телескопов в системе FK4 для эпохи наблюдения и равноденствия 1950.0. Изд-во АН УССР, К., 1963.
2. Джуниль И. В. — См. наст. сб.
3. Король А. К. Склонения ярких и слабых фундаментальных звезд в единой. «Наукова думка», К., 1969.
4. Идельсон Н. И. — Способ наименьших квадратов и теория математической обработки наблюдений. «Геодезиздат», М., 1947.
5. Cohen A. C. — Technometrics, 9, no 1, 1967.

ANALYSIS OF THE OBSERVATIONAL ERRORS OF THE GOLOSEYEVO CATALOGUE OF LATITUDE STARS. I

A. S. KHARIN, Ya. S. YATSKIV

Summary

The observational error distribution and estimation of the most probable values of stellar declinations are studied. It is shown that empirical distribution differs essentially from the normal and can be approximate well either by the compound normal distribution or by the Pearson curve of type VII.

ЗАВИСИМОСТЬ ДРОЖАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗВЕЗД В ТЕЛЕСКОПАХ ОТ ЗЕНИТНОГО РАССТОЯНИЯ

И. Г. КОЛЧИНСКИЙ

(ГАО АН УССР, г. Киев)

Зависимость дрожания изображений звезд в телескопах является важной физической характеристикой оптической нестабильности земной атмосферы. Для характеристики астроклимата и оценки эффективности работы телескопов на различных зенитных расстояниях необходимо знать, на каких предельных зенитных расстояниях в среднем в данном

пункте целесообразно проводить астрономические наблюдения для получения той или иной конкретной информации. С другой стороны, изучение указанной зависимости представляет интерес в связи с проверкой различных теорий дрожания изображений и мерцания звезд, приводящих к вполне определенным законам увеличения дрожаний с изменением зенитных расстояний.

Отметим также, что знание зависимости дрожания изображений от зенитного расстояния бывает необходимо при изучении условий распространения волн в атмосфере, излучаемых лазерными источниками света, которые широко используются в настоящее время в технике.

1. Некоторые следствия из теории распространения волн в турбулентной среде

Теоретические формулы для расчета дрожания изображений звезд получают, полагая, что плоская (с очень большой степенью точности) волна, идущая от звезды, проходит через земную атмосферу, которую весьма схематически можно представить в виде слоя воздуха определенной толщины, ограниченного сверху и снизу горизонтальными плоскостями, параллельными друг другу [22, 29, 19].

Предполагается, что коэффициент преломления воздуха в этом слое в среднем постоянный во времени и пространстве, но подвержен малым случайным флуктуациям. Возникновение этих флуктуаций физически естественно связать с атмосферной турбулентностью, которую лишь с весьма грубым приближением к действительности можно считать однородной и изотропной. Это означает, что при сравнении флуктуаций в двух точках среды, находящихся на заданном расстоянии, не имеет значения, в каком месте среды мы возьмем эти точки и в каком направлении находится одна из взятых точек по отношению к другой. Таким образом, при сравнении флуктуаций в двух точках важно лишь расстояние между ними. Необходимо подчеркнуть, что под словами «сравнение флуктуаций» мы понимаем определение функций, выраждающих степень статистической связи между флуктуациями, т. е. корреляционных или структурных функций.

С большим приближением к действительности можно считать, что в атмосфере осуществляется так называемая локальная изотропия и однородность, иными словами — оба эти свойства реализуются, но крайней мере, в пределах некоторых областей.

Кроме этих предположений, существенное значение имеет еще предположение о сравнительной малости флуктуаций коэффициента преломления, что, в свою очередь, приводит к малым фазовым искажениям на фронте волны, благодаря чему она остается приблизительно плоской. При этих условиях задача о распространении волн в среде со случайными флуктуациями коэффициента преломления может быть сведена к решению линейных дифференциальных уравнений, т. е. осуществлено приближение геометрической оптики без учета дифракционных эффектов.

Для решения задачи, т. е. для получения статистических характеристик флуктуаций фазы и амплитуды световой волны, необходима информация о соответствующих характеристиках флуктуаций коэффициента преломления, которая вводится в условие задачи в виде корреляционных функций, определяющих степень статистической связи флуктуаций в двух точках среды. Такую информацию можно получить из микрометеорологических наблюдений, в результате которых для описания указанных связей между флуктуациями успешно применяются структурная функция Колмогорова—Обухова, корреляционные функции Гаусса и экспоненциальная и некоторые другие.

Упрощенная указанным образом теория приводит к простому следствию, а именно, что флуктуация фазы в точке плоской волны, находящейся вблизи объектива телескопа, равна сумме флуктуаций на всем ее пути через слой. Чтобы получить среднее значение квадрата разности флуктуаций в двух точках плоской волны вблизи объектива, необходимо произвести интегрирование вдоль всего пути, однако с учетом корреляционных связей между флуктуациями, вследствие того, что в общем случае флуктуации в двух точках среды не являются независимыми. Эти связи приходится учитывать как в поперечном направлении, т. е. параллельно фронту волны, так и в продольном, т. е. вдоль лучей, представляющих траектории, перпендикулярные фронту. Благодаря предположенной изотропности флуктуаций вид корреляционных функций в обоих случаях одинаковый. Обозначая через S'_1 и S'_2 флуктуации фазы в двух точках плоской волны вблизи объектива и интегрируя по всему пути, проходимому волной в слое, получаем, что среднее значение квадрата разности флуктуаций пропорционально длине пути L , т. е.

$$\overline{(S'_1 - S'_2)^2} \sim L. \quad (1)$$

При интегрировании предполагалось, что волна входит в слой по нормали к нему, так что L — толщина слоя.

Отметим, что средние значения в данном случае можно представить взятыми как по ансамблю реализаций, т. е. по набору разных атмосфер, так и по времени, фиксируя соответствующие точки в одной и той же атмосфере, так как предполагается, что рассматриваемые случайные функции обладают свойством эргодичности.

То, что в формуле (1) среднее значение квадрата разности флуктуаций должно получиться пропорциональным величине L , можно понять из простых общих соображений. Физически ясно, что на некотором расстоянии $l \ll L$ связь между флуктуациями коэффициента преломления n' должна ослабевать, так что на этом расстоянии их практически можно считать независимыми. Естественно также считать, что на расстоянии такого же порядка независимы и флуктуации фазы. Суммарная флуктуация фазы на пути луча — S' равна сумме независимых флуктуаций S'_i , т. е.

$$S' = \sum_{i=1}^N S'_i,$$

где N — число воздушных элементов на пути луча, флуктуации фазы в которых можно считать независимыми. В таком случае очевидно, что среднеквадратичное значение случайной величины S' пропорционально

\sqrt{N} или $\sqrt{\frac{L}{l}}$. Аналогичное рассуждение справедливо и в отношении суммарной разности флуктуаций в двух точках плоской волны $\Delta S' = S'_1 - S'_2$. Отметим, что $\bar{S}' = 0$, так что отклонение S' от среднего значения, т. е. $S' - \bar{S}'$ равно самому значению этой величины, т. е. S' .

Если между двумя точками 1 и 2 приблизительно плоской волны возникает случайная разность фаз $\Delta S'$, то ее можно интерпретировать как небольшой наклон соответствующего участка плоской волны по отношению к его невозмущенному положению или как небольшое изменение направления прихода световых лучей. Малый угол $\Delta\alpha$ между первоначальным направлением двух параллельных лучей и измененным направлением определяется формулой (см. [19])

$$\Delta\alpha = \frac{\lambda}{D} \frac{\Delta S'}{2\pi}, \quad (2)$$

где λ — длина световой волны, D — расстояние между точками. Из формулы (2) видно, что при постоянном D среднее значение квадрата Δa , как и соответствующее среднее значение квадрата $\Delta S'$, пропорционально длине пути L . Формула для среднего значения квадрата флуктуаций углов прихода двух параллельных световых лучей, находящихся на расстоянии D , имеет вид

$$\overline{(\Delta a)^2} = k^2 C_n^2 L D^{-\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Здесь k — некоторый численный коэффициент порядка 1, а C_n^2 — характеристика интенсивности пульсаций коэффициента преломления, входящая в закон Колмогорова—Обухова —

$$\overline{(n'_1 - n'_2)^2} = C_n^2 Q^{2/3} L_{12}, \quad (4)$$

где n'_1, n'_2 — флуктуация коэффициента преломления в точках 1 и 2, находящихся на расстоянии Q_{12} . Формула вида (4) справедлива для случая локально изотропной однородной турбулентности, когда C_n^2 предполагается постоянной на всем пути вдоль луча. Для лучшего приближения к действительности можно считать, что C_n^2 плавно изменяется вдоль луча [29], хотя и такое предположение во многих случаях, вероятно, далеко от истины. При допущении плавной зависимости C_n^2 от координат в формуле (4) вместо C_n^2 и L фигурирует интеграл

$$\int_0^L C_n^2(x) dx, \text{ где } x \text{ — координата, отсчитываемая вдоль луча, а } C_n(x) —$$

функция от x , предполагаемая известной из наблюдений. К сожалению, в настоящее время сведений о виде этой функции, а тем более ее изменениях в зависимости от метеорологических условий почти нет. Поэтому вопрос о форме зависимости флуктуаций углов прихода световых лучей от длины пути L в общем случае очень усложняется.

Мы уже говорили о среднеквадратичном значении разности флуктуаций фазы для двух лучей, находящихся на расстоянии D . Очевидно, что изображение звезды в телескопе образуется пучком параллельных лучей, взаимные расстояния между которыми $\leq D$, где D — диаметр объектива. Поскольку для каждой пары таких лучей справедлива зависимость (2), то и для всего изображения в целом справедлива та же зависимость угловых флуктуаций от зенитного расстояния. Более того, В. И. Татарский [45] показал, что зависимость угловых флуктуаций от длины пути, проходимой лучом, и диаметра объектива вплоть до численного коэффициента, определяется формулой вида (3) для всего изображения в целом.

2. О методике получения зависимости дрожания изображений от зенитного расстояния по наблюдениям звезд

Для получения зависимости дрожания изображений звезд в телескопах от зенитного расстояния используются фотографии следов, получаемых на фотопластинке при неподвижной трубе. По измеренным отклонениям от среднего направления следа определяют среднеквадратичное значение дрожания, которое относится к зенитному расстоянию, соответствующему середине измеряемого участка следа. Методика определения отклонений изложена в [19].

В течение ночи обычно производится от нескольких до нескольких десятков регистраций следов на разных зенитных расстояниях. Продолж-

жительность каждой регистрации определяется угловыми размерами поля объектива. Например, на 400-миллиметровом астрографе ГАО АН УССР, угловой поперечник поля которого — около 2° , звезда, находящаяся в области неба, близкой к экватору, прочерчивает след, длина которого достигает 20 см, что соответствует 8 мин. На телескопе АЗТ-7, диаметр объектива которого 200 мм, можно получать следы, длина которых не превышает 4 см, что соответствует 1 мин. Если измерение пластинки для получения отклонений производится на координатно-измерительной машине обычным образом, т. е. без применения каких-либо автоматических или полуавтоматических приспособлений,

то при большом количестве пластинок обработка обычно подвергается лишь небольшая часть следа, длина которой не превышает 2—4 см.

Для определения зависимости от зенитного расстояния Z , после получения среднеквадратичных значений отклонений, можно идти двумя путями: найти вид зависимости 1) для каждой ночи в отдельности и 2) для совокупности всех наблюдений, проведенных в данном пункте в течение многих ночей. На практике применялись оба способа. Рассмотрим преимущества и недостатки каждого из них.

Преимущество первого способа в том, что он позволяет изучить возможное влияние метеорологических условий на вид зависимости дрожания от Z .

Рис. 1. Примеры наблюдений с малым и большим разбросом значений дрожания на разных Z (Голосеево).

Однако результаты, полученные по этому способу, не могут иметь решающее значение для проверки выполнимости формулы (3). Действительно, эта зависимость является статистической и может выявиться только при достаточно большом числе наблюдений, проведенных в большом диапазоне зенитных расстояний. Между тем наблюдения, проведенные в течение одной ночи, нередко показывают значительный разброс, который невозможно объяснить только ошибками измерений. На рис. 1 показаны примеры наблюдений с малым и большим разбросом значений дрожания на разных Z . Большую роль в образовании такого разброса играют свойства турбулентности. Если правильно, что дрожание изображений обязано своим возникновением флюктуациям n' турбулентного происхождения, то зависимость дрожания от Z определяется фактическим распределением флюктуаций в некотором объеме воздуха, внутри которого находится пункт наблюдения.

Исследования атмосферной турбулентности, проведенные в последнее время Н. З. Пинусом и его сотрудниками, показали, что характер турбулентности перемежающийся [26]. Зоны повышенной турбулентности в атмосфере перемежаются зонами сравнительно спокойного воздуха; иными словами, структура турбулентности очаговая. Размеры очагов турбулентности изменяются от нескольких десятков метров до 300—400 м по вертикали и от 1—2 до 4—5 км по горизонтали. Если представить, что такой очаг турбулентности находится, например, в зените на высоте 2—2,5 км, то очевидно, что уже при $Z > 45^\circ$ лучи света, идущие от звезд, проходят через области атмосферы, где характер флюктуаций n' может быть совершенно иным, чем при $Z < 45^\circ$. Таким образом, очаговая структура турбулентности может быть причиной значительного

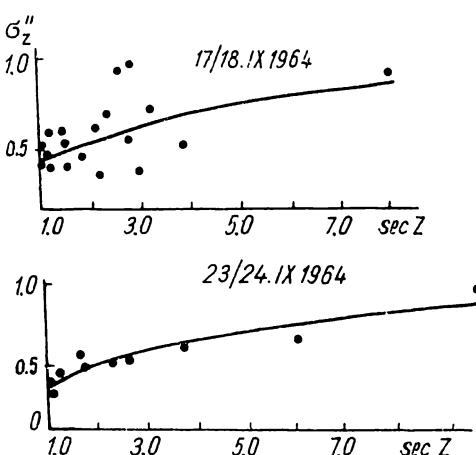


Рис. 1. Примеры наблюдений с малым и большим разбросом значений дрожания на разных Z (Голосеево).

рологических условий на вид зависимости дрожания от Z . Однако результаты, полученные по этому способу, не могут иметь решающее значение для проверки выполнимости формулы (3). Действительно, эта зависимость является статистической и может выявиться только при достаточно большом числе наблюдений, проведенных в большом диапазоне зенитных расстояний. Между тем наблюдения, проведенные в течение одной ночи, нередко показывают значительный разброс, который невозможно объяснить только ошибками измерений. На рис. 1 показаны примеры наблюдений с малым и большим разбросом значений дрожания на разных Z . Большую роль в образовании такого разброса играют свойства турбулентности. Если правильно, что дрожание изображений обязано своим возникновением флюктуациям n' турбулентного происхождения, то зависимость дрожания от Z определяется фактическим распределением флюктуаций в некотором объеме воздуха, внутри которого находится пункт наблюдения.

Исследования атмосферной турбулентности, проведенные в последнее время Н. З. Пинусом и его сотрудниками, показали, что характер турбулентности перемежающийся [26]. Зоны повышенной турбулентности в атмосфере перемежаются зонами сравнительно спокойного воздуха; иными словами, структура турбулентности очаговая. Размеры очагов турбулентности изменяются от нескольких десятков метров до 300—400 м по вертикали и от 1—2 до 4—5 км по горизонтали. Если представить, что такой очаг турбулентности находится, например, в зените на высоте 2—2,5 км, то очевидно, что уже при $Z > 45^\circ$ лучи света, идущие от звезд, проходят через области атмосферы, где характер флюктуаций n' может быть совершенно иным, чем при $Z < 45^\circ$. Таким образом, очаговая структура турбулентности может быть причиной значительного

разброса величин дрожания, получаемых по наблюдениям в течение нескольких часов — сравнительно короткого промежутка времени. Необходимо также учесть, что турбулизированные массы воздуха перемещаются со скоростью среднего ветра в данное время и на данной высоте, что еще больше способствует указанному разбросу, так как наблюдения на разных Z происходят не одновременно.

Из изложенного следует, что наблюдения дрожания на разных Z , проведенные в течение одной ночи, отражают метеорологические условия данной ночи и распределение очагов турбулентности в области атмосферы, просматриваемой с пункта наблюдения. Совокупность результатов этих наблюдений следует рассматривать только как одну из возможных реализаций некоторой случайной функции зенитного расстояния. Поэтому для проверки справедливости формулы (3) целесообразно обрабатывать всю совокупность наблюдений, проведенных в течение некоторого периода. В этом случае в результате усреднения дрожаний, соответствующих определенным интервалам зенитного расстояния, получится более правильное представление об истинной форме зависимости дрожаний от зенитного расстояния.

3. Выбор формул для интерпретации наблюдений

По литературным данным можно установить, что существуют три несколько различных подхода к этому вопросу.

1. Применение формулы с двумя параметрами вида:

$$\sigma_Z = \sigma_0 L^p, \quad (5)$$

где σ_Z — дрожание на данном Z , L — относительная длина пути, проходимого лучом, σ_0 и показатель степени p — подбираемые параметры.

Обычно при не слишком больших зенитных расстояниях $L \sim \sec Z$. Тогда эту формулу пишут в виде

$$\sigma_Z = \sigma_0 (\sec Z)^p, \quad (6)$$

причем подбор параметров производится методом наименьших квадратов по уравнениям

$$\lg \sigma_Z = \lg \sigma_0 + p \lg \sec Z. \quad (7)$$

Значение параметров $\lg \sigma_0$ и p можно приближенно определить также по графику, построенному в логарифмических координатах. Отметим, что часто вместо длины пути L в формуле (5) пользуются относительной «воздушной массой» M , которая существенно отличается от $\sec Z$ только на больших зенитных расстояниях. Например, при $Z=75^\circ$ $M=-3.82$, в то время как $\sec Z=3.86$. При $Z=85^\circ$ $M=10.4$, а $\sec Z=11.47$; при $Z=90^\circ$ $M=35.4$, а $\sec Z=\infty$. С другой стороны, M и $\sec Z$ на больших Z отличаются от действительного значения отношения длины пути, проходимой лучом света, к соответствующей длине пути в зените. Эти отличия M от $\sec Z$ следует учитывать при обработке наблюдений, проведенных вблизи горизонта.

2 Применяется формула с тремя параметрами

$$\sigma_Z = \Delta_0 + \sigma_0 (\sec Z)^p \quad (8)$$

или

$$\sigma_Z = \Delta_0 + \sigma_0 M^p, \quad (9)$$

где M имеет то же значение, что и раньше.

Подбор параметра Δ_0 производится таким образом, чтобы точки, соответствующие зависимостям $\lg (\sigma_Z - \Delta_0)$ от $\lg \sec Z$ или $\lg M$, располагались по возможности ближе к некоторой прямой линии.

3. Используется также формула вида

$$\sigma_Z = \sigma_0 + k \operatorname{tg} Z, \quad (10)$$

где σ_0 и k — параметры, значения которых находят графически или методом наименьших квадратов.

Рассмотрим особенности, связанные с применением этих формул.

Прежде всего к ним относится общее замечание по поводу интерполяционных формул с тремя параметрами и формул с двумя параметрами, а именно: если о виде зависимости между двумя переменными из теоретических соображений ничего не известно, то следует выбирать ту, которая ближе всего подходит к экспериментальным данным и содержит наименьшее число параметров [11]. В рассматриваемом нами случае из теории следует, что зависимость дрожания изображений от зенитного расстояния должна представляться формулой вида (3). Поэтому применение формулы такого вида физически оправдано. Чем можно оправдывать применение формулы (8)?

В работе [1] предполагается, что параметр Δ_0 представляет собой так называемую «турбулентию в башне», которая считается не зависящей от зенитного расстояния. Конечно, турбулентные вихри и соответствующие им флуктуации коэффициента преломления, возможно, есть и в башне, точнее — вблизи объектива телескопа или даже в самой трубе. Флуктуации плотности воздуха, вызываемые такими вихрями, вызывают эффекты искажения фронта волны, которые суммируются с эффектами, возникающими в свободной атмосфере. Можно ли считать, что состояние воздуха вблизи трубы и внутри ее не связано с положением трубы и с ее зенитным расстоянием? Во всяком случае, для ответа на эти вопросы нужны специальные исследования.

Здесь нужно отметить, что метод подбора параметра Δ_0 связан с известным произволом. Если приписать этому параметру указанный физический смысл, то его значение должно быть всегда положительным. Но хотя в работе [1] Δ_0 действительно положительное, в работе [12] значение этого параметра для станицы Суворовской — $0''.96$. Физически не ясно, что это означает. Далее будет показано, что в конкретных случаях применения трехпараметрической формулы представление наблюдений отнюдь не улучшается по сравнению с двухпараметрической.

Остановимся теперь на модификации применения формулы (6), предложенной в работе [6]. Согласно этому способу, значение показателя p в формуле (6) должно получаться по наблюдениям пар звезд, время фотографирования которых различается не более чем на 1 ч. В работе [2] применяется аналогичный способ. При этом для каждой пары звезд можно написать следующие формулы:

$$\begin{aligned} \lg \sigma_1 &= \lg \sigma_0 + p \lg \sec Z_1, \\ \lg \sigma_2 &= \lg \sigma_0 + p \lg \sec Z_2. \end{aligned} \quad (11)$$

Считая, что за время наблюдений значение σ_0 не изменяется, получаем

$$p = \frac{\lg \sigma_1 - \lg \sigma_2}{\lg \sec Z_1 - \lg \sec Z_2}. \quad (12)$$

Но если принять во внимание очаговую структуру турбулентности, то допущение о постоянстве σ_0 в течение 1 ч или даже 0,5 ч весьма сомнительно.

В связи с очаговой структурой турбулентности интересно обратить внимание на то, что значения показателя p , полученные по парам звезд, действительно испытывают разброс в пределах от -1.6 до $+2.00$,

если судить по данным, приведенным в работах [6] и [2]. Для примера приведем здесь рис. 2, который взят нами из работы [2].

Обратимся теперь к формуле (10). Очевидно, эта формула непригодна для зенитных расстояний, близких к 90° , в противоположность формуле (5), где длина пути луча в атмосфере имеет конкретное значение даже при $Z=90^\circ$. На больших зенитных расстояниях $\operatorname{tg} Z \approx \sec Z$, в то время как на малых — $\operatorname{tg} Z \approx \sin Z$. Поэтому формула (10) может быть пригодной в тех случаях, когда вблизи зенита наблюдается быстрый рост дрожаний при увеличении Z . Таковы, например, наблюде-

Таблица 1

Результаты наблюдений, проведенных на Кубани [7]

Зона	$Z_{\text{ср}}$	$(\sigma_x^2)^{0.5}_{\text{ср}}$
0—10°	6°.6	0''.263
11—20	15.8	0.314
21—30	27.1	0.357
31—40	36.1	0.368
41—50	45.8	0.422
51—60	57.2	0.478
61—70	64.8	0.535

ния, проведенные на Кубани [7]. Результаты этих наблюдений представлены в табл. 1, которая соответствует табл. 3 работы [7].

Из табл. 1 видно, что в области зенитных расстояний 0—30° среднеквадратичное значение дрожаний быстро увеличивается, так что отношение $\frac{\sigma(27^\circ.1)}{\sigma(6^\circ.6)} = 1.36$, в то время как отношение $\frac{\sec 27^\circ.1}{\sec 6^\circ.6} = 1.116$, т. е. значительно меньше.

На больших зенитных расстояниях, однако, этот рост замедляется. Формула (6) действительно мало пригодна для интерпретации этих наблюдений. Трудно объяснить, почему вблизи зенита, где длина пути, проходимого лучом в атмосфере, практически не меняется, наблюдается столь быстрый рост дрожаний. Необходимы дальнейшие наблюдения для решения вопроса.

4. Разбор некоторых случаев применения трехпараметрической формулы для интерпретации результатов наблюдения дрожаний

Формула вида (9) применена в работе [12] для интерпретации результатов наблюдений следов в станице Суворовской, Ставропольского края и на Горной Астрономической станции Главной Астрономической обсерватории АН СССР, находящейся в 28 км к юго-западу от г. Кисловодска. Высота первого пункта над уровнем моря — 300 м, второго — 2100 м. Обработано было 108 следов звезд, полученных в Суворовской (август—октябрь 1956 г.), и 227 следов, полученных в ГАС ГАО с февраля по апрель 1957 г.

По средним значениям величин σ_z в определенных зонах зенитных расстояний для обоих пунктов в работе [12] получены следующие трехпараметрические формулы:

$$\text{ст. Суворовская} — \sigma''_c = 1.42 M^{0.2} - 0.96, \quad (13)$$

$$\text{ГАС ГАО} — \sigma''_r = 0.18 M^{0.84} + 0.10. \quad (14)$$

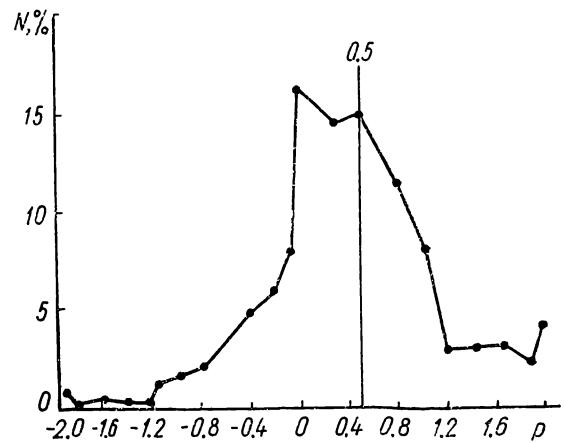


Рис. 2. Распределение значений показателя степени p в формуле $\sigma_z = \sigma_0 (\sec Z)^p$; г. Пиркули.

Средние значения $\sigma_{\text{ср}}$ для каждой зоны, взятые из табл. 3 работы [12], приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Сравнение наблюденных и вычисленных значений
для ст. Суворовской (в $0''.01$)

$Z_{\text{ср}}^0$	$\sigma_{\text{набл}}$	$\sigma_{\text{выч}}$ по (15)	O—C по (15)	$\sigma_{\text{выч}}$ по (13)	O—C по (13)	Количество наблюдений
4	44	48	-4	46*	-2	5
2	46	48	-2	47	-1	5
25	48	50	-2	47	+1	6
35	53	52	+1	52	+1	13
46.5	59	56	+3	57	+2	16
54	62	60	+2	62	0	18
66	73	69	+4	74	-1	15
74	76	81	-5	87	-11	23
82.5	112	110	+2	115	-3	7

В табл. 3 статьи [7] ошибочно напечатано 42.

Таблица 3

Сравнение наблюденных и вычисленных значений
для пункта ГАС ГАО АН СССР (в $0''.01$)

$Z_{\text{ср}}^0$	$\sigma_{\text{набл}}$	$\sigma_{\text{выч}}$ по (16)	O—C по (16)	$\sigma_{\text{выч}}$ по (14)	O—C по (14)	Количество наблюдений
2.5	27	27	0	28	-1	30
14	30	29	+1	28	+2	33
23	28	30	-2	29	-1	24
33.5	32	31	+1	31	+1	35
44.5	33	34	-1	34	-1	29
53.5	38	37	+1	38	0	13
62.5	42	41	+1	44	-2	37
73	56	52	+4	60	-4	23
84	66	84	-18	123	-57	3

Построим графики зависимости $\lg \sigma_{\text{ср}}$ от $\lg \sec Z$ для каждого пункта (рис. 3 и 4). Проведем на этих графиках «на глаз» прямые, достаточно близкие ко всем точкам. Тогда для ст. Суворовской получим значение показателя степени p в формуле (6) равным 0.41. Другие возможные прямые приведут к значениям p , отличающимся от этого значения на несколько сотых в ту или другую сторону. Для ГАС ГАО аналогично получим $p=0.48$. Двухпараметрическая формула (6) дает для этих пунктов:

$$\text{ст. Суворовская} — \sigma_z = 0''.49 (\sec Z)^{0.41}, \quad (15)$$

$$\text{ГАС ГАО} — \sigma_z = 0''.285 (\sec Z)^{0.48}. \quad (16)$$

Для обоих пунктов в работе [2] методом пар звезд найдены средние значения p , равные 0.48 и 0.54 соответственно. Таким образом, даже простое графическое представление данных наблюдений дает возможность получить приближенную оценку p с ошибкой, которая, вероятно, не превысит 0.1.

Покажем теперь, что формулы (15) и (16) лучше представляют наблюдения, чем формулы (13) и (14). Для этого вычислим уклонения наблюденных значений от вычисленных по формулам (13) и (15), а также (14) и (16). Результат вычисления представлен в табл. 2 и 3.

Из табл. 2 видно, что на умеренных зенитных расстояниях формула (13) несколько лучше представляет наблюдения, чем формула (15). Однако при 74° и 82.5 отклонения по первой из них получаются

большими, так что в конце концов сумма квадратов их становится равной 142 и 83 соответственно. Из табл. 3 видно, что на умеренных зенитных расстояниях формула (16) представляет наблюдения не хуже, чем формула (14), а на больших Z формула (14) дает значительные отклонения, так что сумма квадратов отклонений равна 349 и 3277 соответственно.

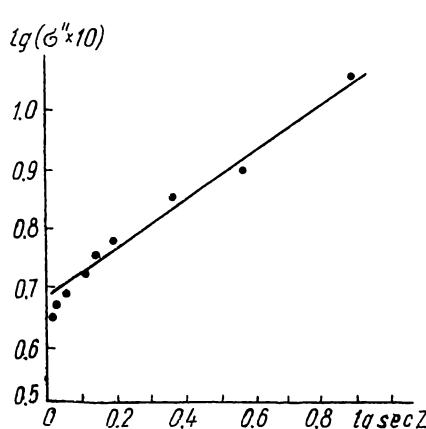


Рис. 3. Дрожание изображений звезд; ст. Суворовская; $p=0.41$.

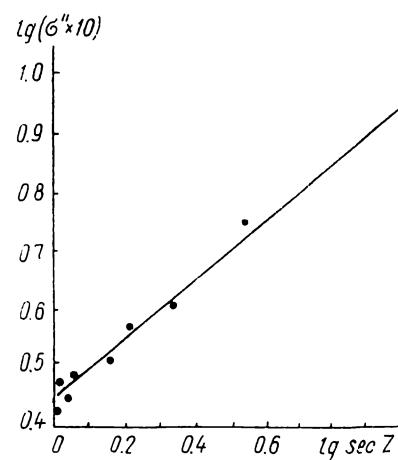


Рис. 4. Дрожание изображений звезд; Горная Астрономическая станция; $p=0.48$.

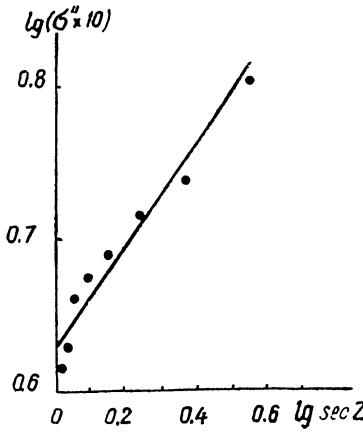


Рис. 5. Дрожание изображений звезд; г. Пиркули; $p=0.33$.

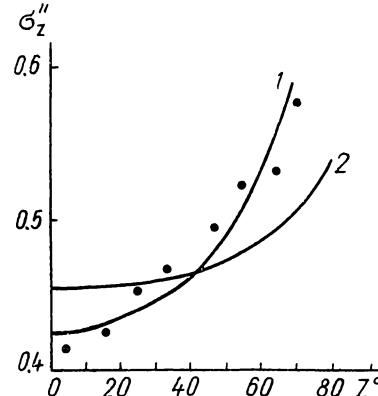


Рис. 6. Зависимость дрожания изображения от Z . Пункт Пиркули:

$$1 - \sigma_z'' = 0.43 (\sec Z)^{0.13}; \quad 2 - \sigma_z'' = 0.39 + 0.07 (\sec Z)^{0.48}.$$

Хотя на $Z=84^\circ$ наблюдений в ГАС ГАО было мало, по нашему мнению, при оценке пригодности обеих формул пренебречь ими не следует, тем более что на умеренных Z трехпараметрическая формула не дает решающего преимущества.

Другая попытка представления данных наблюдений трехпараметрической формулой предпринята в работе [1]. Наблюдения следов производились на г. Пиркули в Азербайджанской ССР с июля 1960 г. по сентябрь 1961 г. [2]. Для этого пункта найдена следующая формула:

$$\sigma_{\Pi} = 0''.39 + 0''.07 (\sec Z)^{0.48}. \quad (17)$$

Данные о средних значениях σ_Z для Пиркули нами приближенно сняты с рис. 3 в работе [1]. По этим данным по графику, построенному в логарифмических координатах (рис. 5), найдены значения σ_0 и p , соответствующие формуле (6), которые приводят к формуле

$$\sigma_{\Pi} = 0''.41 (\sec Z)^{0.33}. \quad (18)$$

Интересно, что то же значение p для Пиркули найдено как среднее по наблюдениям 841 пары звезд [2].

Таблица 4
Сравнение наблюденных и вычисленных значений
для пункта на г. Пиркули (в $0''.01$)

$Z_{\text{ср}}^0$	$\sigma_{\text{набл}}$	$\sigma_{\text{выч}}$ по (17)	$O-C$ по (17)	$\sigma_{\text{выч}}$ по (18)	$O-C$ по (18)	Количество наблюдений
4.9	42	46	— 4	43	—1	57
14.7	43	46	— 3	43	0	104
25.4	46	46	0	44	+2	119
33.2	47	47	0	45	+2	136
44.0	49	47	+ 2	48	+1	118
54.4	52	48	+ 4	51	+1	141
63.0	53	49	+ 4	55	—2	131
72.5	62	52	+ 10	63	—1	49

В табл. 4 представлены результаты сравнения формул (17) и (18). Из этой таблицы видно, что сумма квадратов отклонений О—С при представлении наблюдений формулой (17) достигает 161, в то время как в случае формулы (18) — 16.

На рис. 6 представлены наблюденные значения дрожаний на Пиркули и кривые, соответствующие формулам (17) и (18). Видно, что введение третьего параметра только ухудшило представление наблюдений по сравнению с двухпараметрической формулой.

В [1] анализируются также результаты наблюдений дрожания на г. Картдаг. В этом пункте дрожания практически не зависят от зенитного расстояния. Показатель степени p по двухпараметрической и трехпараметрической формулам должен иметь малое значение. По трехпараметрической формуле для Картдага

$$\sigma_K = 0''.44 + 0''.08 (\sec Z)^{0.02}, \quad (19)$$

а по двухпараметрической в [2] $p=0.18$ (по 433 парам звезд).

Не будем анализировать, какая из этих формул лучше удовлетворяет наблюдениям в Картдаге. Отметим только, что малая зависимость дрожаний от зенитного расстояния получается, например, в районе Большого Алма-Атинского озера по наблюдениям, результат которых сообщен в [32], а также по наблюдениям экспедиции ГАИШ в том же районе, где среднее значение p при представлении по формуле (6) — около 0.2 [10].

Таким образом, применение трехпараметрических формул для интерпретации наблюдений дрожания в пунктах ст. Суворовской, ГАС ГАО, Пиркули трудно оправдать как по физическим, так и по математическим соображениям.

5. Результаты наблюдений дрожаний в различных пунктах.

Общие выводы о зависимости дрожания от зенитного расстояния

В табл. 5 представлены значения параметров σ_0 и p , полученных по наблюдениям дрожания изображений в различных пунктах. Таблица составлена на основании собранной нами информации, которая, воз-

можно, является неполной, так что автор с благодарностью примет все возможные дополнения и исправления. По сравнению с аналогичной таблицей, помещенной в [19], эта таблица существенно дополнена и исправлена. В таблицу включены результаты визуальных, фотографических и фотоэлектрических наблюдений дрожания.

В случаях, когда в цитируемой работе приводились данные о дрожаниях на разных зенитных расстояниях и параметры σ_0 и p специально не подсчитывались, мы пользовались наиболее близкими к зениту результатами наблюдений, редуцируя их к зениту делением на $(\sec Z)^{0.5}$. Такие случаи оговорены в примечаниях, список которых приведен в конце таблицы. Кроме того, в примечаниях расшифрованы некоторые обозначения, заимствованные нами из работ соответствующих авторов. В некоторых случаях мы сочли целесообразным привести значения параметров σ_0 и p по формуле (6), подобранные нами путем построения соответствующих графиков (в логарифмическом масштабе). Отметим еще, что в таблицу включено большое число данных о значениях σ_0 , полученных в период 1931—1932 гг. в связи с предпринимавшимся тогда широким обследованием астроклиматов Кавказа и Средней Азии.

Рассмотрим некоторые выводы из табл. 5. Основной вывод представлен в виде табл. 6, где дано распределение результатов наблюдений по разным значениям показателя p . Из табл. 6 видно, что в большинстве пунктов значение p находится в интервале 0.4—0.6. В этот интервал попадает половина всех пунктов, включенных в табл. 5, причем ему соответствуют как визуальные, так и фотографические и фотоэлектрические наблюдения. Наблюдения в Таджикистане, результаты которых приведены в [9], в соответствии с примечанием 26 к табл. 5 мы отнесли во вторую группу, т. е. считали, что значение p находится в интервале 0.4—0.6.

Таким образом, анализ наблюдательных данных показывает, что в ряде пунктов выполняются условия, весьма близкие к тем, при которых осуществляется закон роста дрожаний пропорционально корню квадратному из длины пути, проходимой лучом света в атмосфере. Основное из этих условий заключается в том, что число N элементов турбулентности на пути луча, флуктуации в которых можно считать независимыми, велико, вследствие чего оправдывается статистический «закон \sqrt{N} ». Те случаи, где этот закон не выполняется, например, когда дрожание изображений вовсе не зависит от зенитного расстояния или когда оно растет слишком быстро в околосенитной зоне, мы предполагаем рассматривать как своего рода аномалии, возможно связанные с рельефом местности. Причины этих аномалий следует изучать особо. Предположения о некоторых из них были высказаны в [19]. В связи с изложенным, при интерпретации результатов наблюдений предпочтительнее пользоваться двухпараметрическими формулами (5) и (6), имеющими определенный физический смысл. Применение трехпараметрических формул, по крайней мере на основании уже предпринятых попыток, нельзя считать достаточно обоснованным. При применении двухпараметрических формул с целью проверки теоретического закона зависимости дрожания от Z следует иметь достаточно много наблюдений в широком диапазоне зенитных расстояний. Желательно обрабатывать наблюдения как в течение одной ночи, так и все наблюдения, полученные в течение некоторого периода целиком.

При анализе наблюдений, полученных в течение одной ночи, и сравнении результатов, полученных в разные ночи, необходимо иметь в виду, что вследствие очаговой структуры турбулентности разброс значений p может быть значителен. Именно в этом случае, а не в случае обработки всех наблюдений, как указывалось в [6], можно получить «все что угодно». Это подтверждается разбросом значений показателя p , полученных, например, по методу пар звезд. Наоборот,

Сводная таблица результатов наблюдений дрожания изображений звезд в телескопах
(Дрожание в зените σ_0 дано в секундах дуги)

Наблюдатель или автор сообщения	Место наблюдений	Период наблюдений	Инструмент	Дрожание в зените σ_0	Рост дрожания в зависимости от Z , значение показателя степени p	Литературный источник
A. Визуальные наблюдения						
1. М. А. Грачев	Казань, Обсерватория им. Энгельгардта	1906—1907	Меридианный круг	$(m_z) z=0 = 0.23$	$m_z = \pm 0.50 / \sec \zeta - 0.78$	[3]
2. Т. А. Банаевич	Там же	1913	Экваториал ($D=30$ см)	$\left(\frac{s}{2}\right) z=0 = 0.94$	$\frac{s}{2} = 2.00 / \sec \zeta - 0.78$	[3]
3. А. Ф. Субботин	Ташкент, Обсерватория	1927—1928	Рефракторы ($D=6.7$ см; 16.2 см; 24 см)	0.4 (лето) 0.7 (зима)	$p = 0.45$ $p = 0.83$	[28]
4. А. В. Марков, В. Б. Никонов	Нагорный Карабах Шуша (1400 м) Лысогорск (1875 м) Ленинград (1200 м)	1930	Рефрактор ($D=5.8$ см)	2.9 2.3 1.7	[24]	
5. Е. К. Харадзе	Грузия	1931	Рефракторы ($D=6$ см; 8 см) Стандартная диафрагма 5 см	2.4 1.7 1.3 0.6	[33]	
Бакуриани Абастумани Шуамта Цеми (лучшая ночь)						
6. П. Г. Добронравин	Средняя Азия	1931	Рефрактор с диафрагмой 5 см	3.4 2.1 2.1 2.3 3.4 0.9 0.9 1.1	[16]	
Ошский район Ак-Хана (1150 м) Мады (1200 м) Ош (1038 м) Ташкент (500 м) Чимган I (1450 м) Чимган II (1700 м) Алма-Ата I (1100 м) Алма-Ата II (1700 м)						

7. В. Б. Никонов
Кахетия
Шуамта (960 м)
Ломборы (1105 м)
Тетрис Цхали (1220 м)

1932 Рефрактор с диафрагмой 5 см

0.9
1.9
0.0
1.9
(безветренно)

Там же

8. П. П. Доброравин
Северный Кавказ
Эльчик-Доут (3000 м)
Там же (наблюдения
В. В. Фельинского)
Мал. Хагепара (2900 м)
Кисловодск (900 м)
Арм-Хи (1400 м)
Кашет (1600 м)
Столовая гора (3000 м)
Абастумани,
Обсерватория (1500 м)

1932 Рефрактор с диафрагмой 5 см

0.4
0.6
0.3
0.6
1.1
0.3
0.4
0.3

Алма-Ата (Ремизовка)
Б. С. Соколова
1947
Рефрактор
 $D = 3 \text{ см}$,
 $F = 50 \text{ см}$
с очень сильным
увеличением

9. Е. К. Харелзе
Обсерватория (1932—1933)
1947
Рефрактор
 $D = 7.8 \text{ см}$

10. В. Г. Фесенков и
Б. С. Соколова
1947
Рефрактор
 $D = 33 \text{ см}$

11. Е. Я. Богуславская
Москва, Обсерватория
ГАИШ
1903—1935 Рефрактор
 $D = 38 \text{ см}$,
 $F = 6.5 \text{ м}$

12. Е. Пржнибылок
Кенигсберг
1922—1929 Рефрактор
 $D = 33 \text{ см}$

13. Б. Стремгрен
Копенгаген
1942—1945 Рефракторы
 $F = 4.7 \text{ и } 4.1 \text{ м}$
Диафрагмы 9 см,
расстояние между
центрами от-
верстий 26 и
16 см

14. Гансон,
Кристенсен и др.
Швеция
Лунд и окрестности
1947—1948 Рефракторы, диа-
фрагмы 9 см, на
расстоянии 16 см

1932 Рефрактор с диафрагмой 5 см

0.9
1.9
0.0
1.9
(сильн. ветер)

1947
Рефрактор
 $D = 0.5 \text{ м}$

Наблюдатель или автор	Место наблюдений	Период наблюдений	Инструмент	Дрожание в зените σ_0	Рост дрожаний в зависимости от Z , значимые показателя стечения p	Продолжение табл. 5	
						Литературный источник	
15. В. Г. Фесенков	Алма-Ата Большое Алма-Атинское озеро	1951—1952	Горизонтальный телескоп	0.3—0.4	Дрожание не зависит от Z вплоть до 80°	[32]	
16. И. Г. Колчинский	Киев, Голосеево, Обсерватория Академии наук	1955—1956	Астрограф	0.31	$p=0.53$	[20]	
17. Н. И. Кучеров		1956—1957	Телескоп АЗТ-7	0.39	Среднее $\frac{p}{\rho}$ (в обозначениях Н. И. Кучерова n_α) — 0.75 $\rho=0.36$	[23]	
18. Л. Н. Тулленкова	Казахская ССР Обсерватория Астрофизического института	1956—1957	Рефрактор, увеличительная камера	0.30		[30]	
19. Ш. Г. Дарчия и др.	Стахополиский край ст. Суворовская (высота 300 м) Горная астрономическая станция (28 км к ю.-з. от Кисловодска, высота 2100 м)	1956—1957	AЗТ-7	0.44	Для обеих станций авторами найдены эмпирические формулы: $\sigma_{Cv} = 1.42 M^{0.2} - 0.96$ $\sigma_{GAC} = 0.18 M^{0.8} + 0.10$	[12]	
		1958	AЗТ-7	0.27	По формуле (5) $\rho_{Cv} = 0.41$ $\rho_{GAC} = 0.48$		
20. Г. Я. Васильев	Алатау	1957	AЗТ-7	0.30			
21. Н. В. Быстро娃	Пулково	1957—1958	AЗТ-7	0.29			
22. О. П. Васильяновская	Памид, район Мургаба, Чечкенты	1959—1960	AЗТ-7	0.23			
23. О. Б. Васильев и В. В. Вязовов	Краснодарский край, пос. Боганка	1960	AЗТ-7	0.29	Большинство пайденных методом пар звезд значений p находятся в пределах 0—0.5	[6]	
24. К. Г. Джакушева, Ю. И. Глушков и др.	Казахстан Ассы (2200 м) Конур-Олен (1100 м) Каминское плато (1350 м)	1960—1961	AЗТ-7, Рефрактор ($D=20$ см, $F=15.7$ м) с линзой Барлоу	0.41 36 36	При обработке применялась формула $\sigma_z = \sigma_0 + k \lg Z$, удовлетворяющая наблюдениям	[7]	
					Хотя зависимость дрожания от Z в целом по всему материалу наблюдается, однако для различных точек она не всегда явно выражена и имеет различный вид в отдельных случаях	[15]	
25. К. И. Козлова	Южный Казахстан Биликово (1115 м)	1960—1961	AЗТ-7		Отчетливо выраженной зависимости от Z не обнаружено	[18]	
26. О. П. Васильяновская	Таджикистан Искандер-Куль (2260 м) Санглук (2237 м) Ходжа-Оби-Гарм (2000 м)	1960—1963	AЗТ-7	0.43 0.21 0.37	Автор пользовался зависимостью $\sigma_z = \sigma_0 + k \lg Z$, которая достаточно хорошо удовлетворяет наблюдениям	[9]	

27. Н. А. Башнякович, Горная Астрономическая
Н. В. Быстрова и др. станция (близ Кисло-
воска) Гарни, Армянская ССР
Зеленчукская, Ставро-
польского края Цихиджвари, Грузин-
ская ССР
- 1960 АЗТ-7
- 0.32
- Если сравнять средние дрожания в зоне 56° — 70° с аналогичными величинами в зоне 0° — 35° , отнеся их к средним $Z = 17^{\circ}5$ и 63° соответственно, то среднее значение отношения ρ для всех станций, кроме Цихиджвари, составляет 1.43 (1.22 , 1.32 и 1.74 соответственно по каждой станции), в то время как $\left(\frac{\sec 63^{\circ}}{\sec 17^{\circ}5} \right)^{0.5}$ составляет 1.45

28. Г. В. Ахундова,
А. А. Алиев и др.
Г. Азербайджан
Г. Пиркули (1450 м)
г. Карагдаг (1975 м)
- 1960—1961 Кавказ,
Азербайджан ССР
- 0.43
- Если сравнять средние дрожания в зоне 56° — 70° с аналогичными величинами в зоне 0° — 35° , отнеся их к средним $Z = 17^{\circ}5$ и 63° соответственно, то среднее значение отношения ρ для разных звезд находится в пределах от -0.3 до $+0.6$. Среднее значение 0.18
- 0.33
- 0.43
- 0.33
- 0.46
- 0.18
- 0.02
- 0.38
- 0.41
- 0.46
- 0.36
- 0.42
- 0.49

Значения ρ для разных звезд находится в пределах от -0.3 до $+0.6$. Среднее значение 0.18

0.43

0.33

0.46

0.18

0.02

29. Э. А. Винокурова,
Л. М. Гиндлинс и др. Ал-Тай (50 км от Ал-
маты, вблизи Большого
озера (3000 м)
Киев, Голосеево
Обсерватория
- 1962—1963 Рефрактор
($D = 20$ см,
 $F_{\text{акв}} = 13.9$ м)
(линиза Барлоу)
- 1963 АЗТ-7
- 1964 АЗТ-7
- 0.58
- 0.41
- 0.46
- 0.38
- 0.42
- 0.51
- 0.36
- 0.49

По данным наблюдений в течение
6 ночей $\rho = 0.43 \pm 0.04$

0.33

0.46

0.18

0.02

Примечания к табл. 5

- № 1, 2. $n_i Z$ — часть ошибки погрешения на звезду, зависящая от дрожания изображений. $s/2$ — разность отсчетов микрометра на паницизее и паницизее положения звезды в течение 1 мин. Наблюдения производились вблизи меридиана. № 3. Производилась оценка «скакцов» изображений в поле зрения. Указанные значения σ_0 получены по выравненной кривой роста дрожания s от зенита. Значение дрожания оценивалось по колебанием изображения по $\cos(45^{\circ})$. № 5. Одинаки дрожания относительно стеки инструмента с определенным угловым расстоянием между нитями. № 6. То же. № 8. То же. № 9. Оценка дрожания получена непосредственно по наблюдениям вблизи зенита. № 10. То же. № 11. Значения σ_0 и ρ найдены по ассеи совокупности наблюдений в пределах изменения Z от 21 до 65° . № 12. В этом случае найдено по средним значениям абсолютных величин уклонений от направления склада. Считая, что уклонения подчиняются закону Гаусса, получаем, что среднеквадратичное значение σ_0 в $\left(\frac{\pi}{2}\right)^{0.5}$ раз больше. Таким образом, значение σ_0 равно $0''.24$ (оно приведено в скобках). № 12. Это значение σ_0 соответствует $Z = 17^{\circ}$. № 14. Применился метод А. Кудара. σ_0 — среднее для четырех пунктов, расположенных к зениту делением на $\sqrt{\sec Z}$. Данные взяты из таблицы 4 [46]. № 19. Значения σ_0 , приведены средними значениями для интервала зенитных расстояний 0° — 10° . По приведенным в статье [12] формулам при $M=1$ получается $\sigma_0 \text{Cub} = 0''.28$, № 20. Среднее по 5 следам при $Z < 30^{\circ}$. № 21. Применялся метод А. Кудара. Среднее значение $\sigma_0 = 0''.36$, соответствующее $\sec Z = 1.45$, приведено к зениту делением на $(\sec Z)^{0.5}$. № 24. Для Конур-Олена по графику, построенному в логарифмическом масштабе, $\rho = 0.3$. № 26. Представление средних значений σ_0 в соответствии с работой [5] показывает, что среднее значение об подсчитано нами по данным для зон 0° — 35° . Отдельные интервалы изменения σ_0 в соответствии с работой [5] показывают, что среднее значение, равные $0''.15$, $0''.4$, $0''.6$, $0''.7$. В Цикаджвари получено всего 9 следов. № 28. ρ найдено в обоих случаях как среднее по наблюдениям в пределах, в скобках приведены значения σ_0 , полученные по трехPARAMETRICHESKOGO FORMLIKE. Значения σ_0 для Пиркули и Картдага сняты с рис. 3 в работе [1]. № 30. В 1963 г. обработано 267 следов, полученных в течение 18 ночей. В 1964 г. обработано 252 следа, полученных в течение 18 ночей.

Таблица 6

Значения показателя p в различных пунктах (показатель p соответствует формуле (5))

$0 \leq p < 0.4$	$0.4 \leq p < 0.6$	$0.6 \leq p < 1.0$	Зависимость от $\sec Z$ не-определенна	Другие фор-мы зави-сности
Фотографи-ческие на-блюдения Казахстан, Обсервато-рия Астрофиз. ин-та Пулково Заилийский Ал-Ата Казахстан, Конур- Олең Кавказ, Азербай- джан, Пиркули Кавказ, Азербай- джан, Картдаг	Визуальные наблюдения Казань Ташкент (лето) Алма-Ата, Ремизовка Фотографические наблюдения Москва Киев, Голосеево Суворовская Горная Астроном. станция под Кисловодском Копенгаген Чечеты (Памир) Таджикистан, Ходжа-Оби-Гарм Таджикистан, Искандер-Куль Фотоэлектрические наблюдения Южная Америка, Церро Морадо	Визуальные наблюдения Ташкент (зима) Фотографи-ческие на-блюдения Анапа	Казахстан Ассы Каменское плато Блинково (Южн. Ка-захстан)	Визуальные наблюдения Грузия, Абасту- маны Фотографи-ческие на-блюдения Кубань, пос. Бота- ника

из табл. 5 и 6 следует, что при обработке всех наблюдений целиком получаются вполне определенные значения p , в большинстве случаев близкие к 0.5. Как нам кажется, это особенно убедительно показано анализом большого количества наблюдений следов в 1963 и 1964 гг., проведенным в ГАО АН УССР Г. В. Мороз. Вместе с тем подчеркиваем здесь важность получения большого количества наблюдений в отдельные ночи и анализа полученных результатов в зависимости от метеорологических условий.

6. Дрожание изображений в зените в разных пунктах

При сопоставлении результатов дрожания изображений в разных пунктах возникает вопрос о том, можно ли на одинаковых Z , в частности в зените, сравнивать между собой данные, полученные на различных инструментах. Как видно из формулы (3), при таком сравнении нужно только учитывать различие в диаметре объектива. Однако из этой формулы следует, что при увеличении диаметра объектива вдвое дрожание уменьшается всего в $2^{1/6}$ (1.12) раза. Измерения, проведенные нами [19, 21], показывают, что приблизительно такое уменьшение получается в действительности. Из табл. 6 следует, что значительная часть фотографических наблюдений дрожания проведена с помощью инструментов диаметром около 20 см. Диаметр наибольшего из применявшихся для этой цели объективов — 40 см, а наименьшего — 14 см. При визуальных наблюдениях большая часть оценок проведена со стандартной диафрагмой на объективе 5 см. Вероятно, в результате того, что коэффициент редукции близок к единице, целесообразно сравнить между собой значения дрожаний в различных пунктах, приведя все дрожания хотя бы к диаметру объектива 20 см. Значения полученных таким образом дрожаний нанесены на рис. 7 (визуальные наблюдения) и рис. 8 (фотографические наблюдения). Среднее значе-

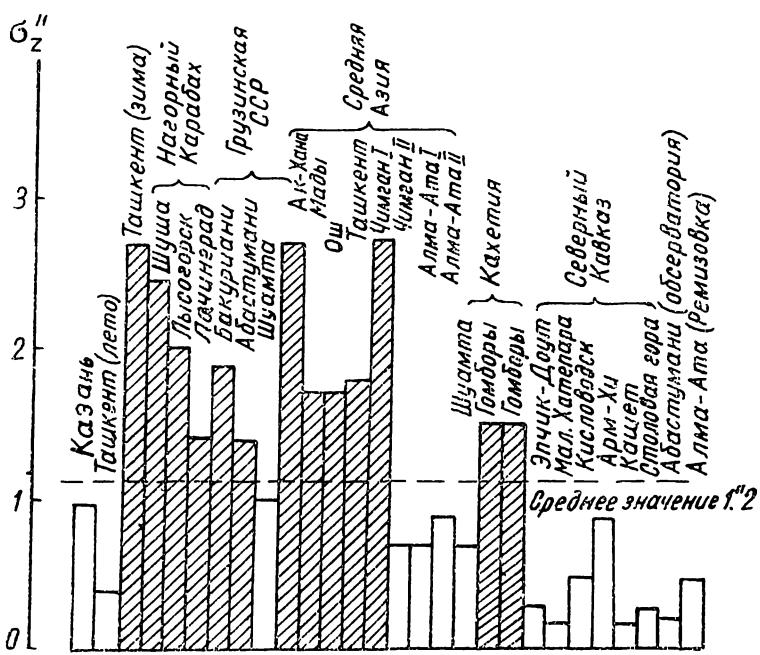


Рис. 7. Визуальные оценки дрожания изображений в зените, приведенные к диаметру объектива 20 см.

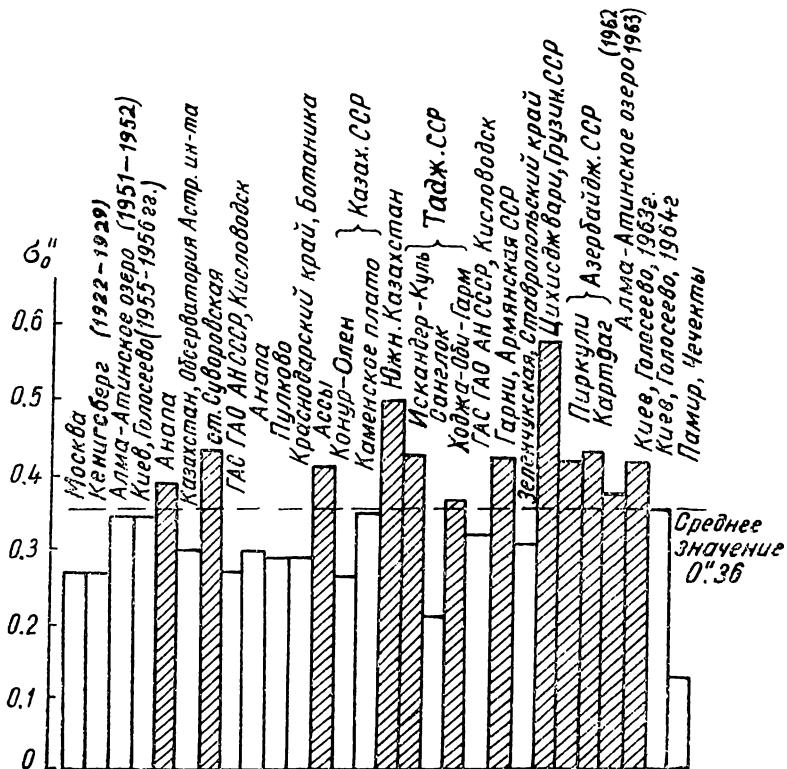


Рис. 8. Среднеквадратичные значения дрожания изображений в разных пунктах в зените σ_0 , приведенные к диаметру объектива 20 см.

ние дрожаний для визуальных наблюдений составляет $1''.2$ ($\pm 0''.1$), а для фотографических $0''.36$ ($\pm 0''.02$).

Заметим теперь, что при обработке измерений следов нами определены не только среднеквадратичные, но и максимальные для данного участка следа отклонения от его среднего направления. Следы были получены на 40-сантиметровом астрографе, длина измеренных участков, как правило, составляла 2 см, что соответствовало 400 измеренным точкам или 50 сек для экваториальной звезды. Среднее значение отношения максимального отклонения к среднеквадратичному по 65 следам 3.2 (минимум 1.4, максимум 9.2). Это хорошо совпадает с отношением среднего значения дрожаний для всех визуальных наблюдений к аналогичному значению для фотографических, которое составляет на основании приведенных данных 3.3. Следовательно, при визуальных наблюдениях наблюдатель успевает наводить только в те моменты, когда изображение находится в максимальном отклонении. Время, необходимое для того, чтобы успеть сделать наведение и зарегистрировать отсчет, по-видимому, было близко к 1 мин.

Величины $1''.2$ и $0''.36$ можно предварительно считать некоторыми стандартами для средних значений визуально и фотографически наблюдаемых дрожаний в зените. Из рис. 7 видно, что по данным визуальных наблюдений очень малые дрожания в зените наблюдаются на Северном Кавказе. По данным фотографических наблюдений (рис. 8) малые дрожания в зените наблюдаются на Горной Астрономической станции близ Кисловодска, на Санглоке (Таджикистан), в Чечектах (Памир), Зеленчукской (Ставрополье). Значения дрожаний, наблюдаемых в ГАО АН УССР в Голосееве, нужно считать средними.

Было бы интересно включить в наши таблицы ряд новых пунктов и проверить, останутся ли полученные стандартные значения прежними.

7. Зависимость оценок дрожания изображений по способу Данжона—Кудэра от зенитного расстояния

Оценки дрожания изображений, получаемые по способу Данжона—Кудэра, косвенные, так как непосредственно в телескоп наблюдается вид дифракционной картины. Оценки дрожания изображений, или так называемой «турбулентии», на разных Z получаются при переходе от оценок, сделанных по 5-балльной шкале к величинам дрожания, которые соответствуют определенным баллам качества изображений. Переход от шкалы оценок качества к «турбулентии» нелинейный. В [2] указано, что поскольку явления дрожания изображений и изменения вида дифракционной картины вызываются заведомо различными по величине атмосферными неоднородностями, нет никаких оснований считать их законы изменения с Z идентичными. Некоторые авторы (см. [2]) считают, что вид дифракционной картины обусловливается сравнительно небольшим приземным слоем воздуха. Рассмотрим подробнее этот вопрос.

Действительно, изменения дифракционной картины должны вызываться флуктуациями фазы, масштабы которых (т. е. линейная протяженность области фронта волны, где эти флуктуации возникают) значительно меньше диаметра объектива. Дрожания, т. е. смещения всей дифракционной картины, должны быть связаны с флуктуациями фазы больших масштабов. Но так как первые из этих флуктуаций меньше вторых, то по отношению к ним должен быть в еще большей степени справедлив закон возрастания среднеквадратичных флуктуаций фазы пропорционально \sqrt{N} , где N — число неоднородностей на пути луча. Поэтому следовало бы ожидать, что искажения дифракционной картины, связанные с флуктуациями фазы, также следуют этому закону.

Таблица 7

Турбулентция в зените по данным различных наблюдений (в 0'.01)

Наблюдатель или автор сообщения	Место наблюдений	Период наблюдений	ρ	Турбулентция в зените	Примечания
Т. Видори	Вена	1939	40	На зенитн. расст. 30°, 3"-ый телескоп	[43]
Р. Кутре и Л. Босси	Африка, Конго Вершины Киву Мун Гахинга Майи Кашонголере Кирунгу Мугавура	1948	15 16 18 13 14 12		[36]
Ш. Бойер	Дагомея, Котону	1953	25	Сезон дождей, D объектива — 200 мм	[35]
К. Серковский и Е. Стодулкевич	Франция, Ауха Дагомея, Котону Польша, близ Варшавы (от 37 до 61 км) Мала Весь Островник Редужин Воля Рафаловска	1953—1955	42 22	Сухой сезон	[41]
Ш. П. Дарчия	Пулково	1956—1957	45	AЗТ-7 и ТЭМ-140	[14]
А. Х. Дарчия и Ш. П. Дарчия	Джемете (Кавказ) ст. Суворовская (Ставроп. край) Турчиаг (Дагестан)	1957	33 35	AЗТ-7	[13]
О. П. Васильевская	Горн. Астрон. станция близ Кисловодска	1957—1958	33 28	AЗТ-7	[9]
К. Г. Джакушева и др.	Таджикистан Искандер-Куль Санглок Чечекты Ходжа-Оби-Гарм	1960—1961	43 25 19 42		[15]
А. Д. Скоропупов Э. А. Винокурова, Л. М. Гиндилис и др.	Казахстан Конур-Олен Каменское плато Ассы	1960—1961	39 42 41	Рефрактор с линзой Барлоу, D объектива — 20 см	[10]
В. Добричев, Б. Ковачев	Новосибирск Западный Алтай, район Большого Алма-Атинского озера	1961—1962	33	AЗТ-7	[27]
		1961—1963	37	Рефрактор с линзой Барлоу, D объектива — 20 см	[10]
	Болгария с. Плана Несебер Стара Загора	1965	23 30 31	Рефракторы, D объектива — 15 см	[38]

В действительности, сднако, если представить получаемую из наблюдений «турбулентцию» формулой вида (5), то значения ρ нередко близки к 1. Так, например, получается по данным работы [2] на Пиркули и Картдаге. В работе [10] среднее значение ρ составляет 0.8 при изменении от 0.2 до 1.4.

Нам кажется, что тенденцию к увеличению показателя ρ для оценок по способу Данжона—Кудэра по сравнению со значением ρ , получаемым по наблюдениям следов, можно объяснить тем, что качество изображения в первом случае зависит не только от флуктуаций фазы,

но и от других факторов. Главным из них, возможно, является атмосферная дисперсия, т. е. различие рефракции для различных длин волн. Благодаря этому изображение звезды представляется при наблюдении в телескоп спектром, угловая величина которого на зенитном расстоянии 65° достигает $4''$. Для телескопа с диаметром объектива 20 см это примерно в три раза превышает теоретическую величину диаметра дифракционного диска звезды. Поскольку изображение принимает вид спектра, растянутого в вертикальном направлении, видимость дифракционной картины на больших Z ухудшается, что ведет к завышению оценок по шкале Данжона—Кудэра (т. е. сдвигу их в худшую сторону). Это обстоятельство и может привести к более быстрому росту оценок «турбулентции» с изменением зенитного расстояния по сравнению с оценками дрожания по следам.

Оценки «турбулентции», получаемые по способу Данжона—Кудэра, не могут с полным основанием считаться объективными, так как способность наблюдателя давать правильную оценку, вероятно, также изменяется с зенитным расстоянием, и притом для каждого наблюдателя по-своему.

В табл. 7 мы приводим значение угла турбулентии в зените по данным ряда наблюдений. Среднее значение угла турбулентии равно $0''.27$. При этом усреднении никакой редукции за диаметр объектива не производилось, так что к полученному значению нужно отнести с осторожностью. Минимальное значение $0''.12$ наблюдалось на вершине Мугавура в Африке с 3"-ым телескопом. Максимальное значение $0''.45$ получилось в Пулково. В связи с этим нужно заметить, что приведенное в табл. 5 значение дрожания в зените в Пулково, равное $0''.29$, возможно, относится к сравнительно хорошим ночам. Указанное общее среднее значение угла турбулентии в зените несколько меньше, чем такое же среднее для дрожания, определенного по следам, которое равно $0''.36$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахундова Г. В. --- Сообщ. Шемах. астрофиз. обсерватории, 1966, 2, 61—68.
2. Ахундова Г. В., Алиев А. А. и др. — Изв. АН Азерб. ССР, сер. физ.-мат. и техн. наук, 1963, I, 95—110.
3. Банахевич Т. А. — Три эскиза по теории рефракции. Казань, 1915.
4. Богуславская Е. Я. — АЖ, 1938, 15, 5—6, 450—455.
5. Башнякович Н. А., Быстрова Н. В. и др. — Изв. ГАО АН СССР, 1962, 22, № 170, 155—156.
6. Быстрова Н. В. — В кн.: Труды совещ. по исслед. мерцания звезд. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1959, 155—164.
7. Васильев О. Б., Вязовов В. В. — Изв. ГАО АН СССР, 1962, 22, № 170, 144—154.
8. Васильева Г. Я. — В кн.: Труды совещ. по исслед. мерцания звезд. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1959, 165—172.
9. Васильяновская О. П. — Бюлл. Ин-та астрофиз. Тадж. ССР, 1965, № 39—40, 47—78.
10. Винокурова Э. А., Гиндилис Л. М. и др. --- Труды ГАИШ, 1966, 34, 20—35.
11. Гутер Р. С. и Овчинский Б. В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. Гос. изд-во физ.-мат. лит., М., 1962, стр. 350.
12. Дарчия А. Х., Чмиль Л. Ф. и др. — Изв. ГАО АН СССР, 1960, 21, № 165, 52—72.
13. Дарчия А. Х., Дарчия Ш. П. — В кн.: Труды совещ. по исслед. мерцания звезд. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1959, 202—215.
14. Дарчия Ш. П. — Астрон. циркуляр АН СССР, 1958, 189, 21—24.
15. Джакушева К. Г., Глушков Ю. И. и др. — Труды Астрофиз. ин-та АН Казах. ССР, 1963, 4, 5—48.
- 16—17. Добронравов П. П. — Бюлл. Астроном. ин-та, 1935, 38, 332—337; 345—349.

18. Козлова К. И. — Труды Астрофиз. ин-та АН Казах. ССР. 1963, 4, 49—67.
19. Колчинский И. Г. Оптическая нестабильность земной атмосферы по наблюдениям звезд. «Наукова думка», К., 1967.
20. Колчинский И. Г. — Изв. ГАО АН УССР, 1961, 3, 2, 27—67.
21. Колчинский И. Г. — Изв. ГАО АН УССР, 1963, 4, 2, 3—15.
22. Красильников В. А. — Изв. АН СССР, сер. географ. и геофиз., 1949, 13, 1, 33—57.
23. Кучеров Н. И. — В сб.: Труды совещ. по исслед. мерцания звезд. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1959, 183—202.
24. Марков А. В., Никонов В. Б. — Бюлл. Астроном. ин-та, 1930, № 31, 119—129.
25. Никонов В. Б. — Бюлл. Астроном. ин-та, 1935, № 38, 337—344.
26. Пинус Н. З., Щербакова Л. В. — Физ. атмосферы и океана, 1966, 2, 11, 1126—1134.
27. Скоропупов А. Д. — В сб.: Оптическая нестабильность земной атмосферы. «Наука», М.—Л., 1965, 122—137.
28. Субботин А. Ф. — Труды Ташк. астр. обс., 1930, 3, 79.
29. Татарский В. И. Теория флюктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере. Изд-во АН СССР, М., 1959.
30. Туленикова Л. Н. — Изв. Астрофиз. ин-та, Казах. ССР, 1958, 7, 74—77.
31. Фесенков В. Г. — Изв. АН Казах. ССР, Астрон. и физ., 1947, 1.
32. Фесенков В. Г. — Изв. Астрофиз. ин-та АН Казах. ССР, 1955, 1, вып. 1—2, 23.
33. Харадзе Е. К. — Бюлл. Астрон. ин-та, 1931, № 38, 313—318.
34. Харадзе Е. К. — Бюлл. Абастуманской астрофиз. обс., 1937, 21, 111—115.
35. Boyer Ch. — L'Astronomie, 1954, 68, 79—80.
36. Coutrez B. et Bossy L. — Ann. de l'Observ. Roy. de Belgique, 1954, 6, 5.
37. Hansson N., Kristenson H., Nettelblad F., Reiz A. — Ann. d'Astrophys., 1950, 13, 275.
38. Добричев В., Ковачев В. — Изв. на секц. по астроном. Болгарска Академия на Науките, 1967, 1, 31—45.
39. Irvin J. B. — Astron. J., 1966, 71, 1, 28—29.
40. Przybylak E. — Astron. Nachr., 1930, 237, 5681.
41. Serkowski K., Stodólkiewicz J. — Acta Astronomica, 1960, 10, 3.
42. Strömgren E. — Mat. Tidsskrift, Forste Del. 1945, 15, 189—204.
43. Widorn T. — Mitt. der Univ. Sternw. Wien, 1954, 6, 11.
44. Колчинский И. Г. — АЖ, 1952, 29, 3, 350—362.
45. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. «Наука», М., 1967, 392.
46. Быстрова Н. В. — Изв. ГАО АН СССР, 1960, 21, № 165, 38—72.
47. Мороз Г. В. — В сб.: Вопросы атмосферной оптики «Наукова думка», 1969, 72—87.

DEPENDENCE OF STAR IMAGE MOTION ON ZENITH DISTANCE

I. G. KOLCHINSKY

Summary

Some questions which deal with the dependence of star image motion in the telescopes on zenith distance are considered.

It is shown that the use of the expression

$$\sigma_z = \sigma_0 (\sec Z)^p,$$

where σ_z is the r.m.s. value of image motion at the given zenith distance — Z , σ_0 and p parameters determined by the least square method, is more justified from physical and mathematical points of view than the use of analogue formula with three parameters.

The summary of observations in various places is given. It is shown that in many places the value of the exponent in the formula mentioned is near 0.5, in agreement with the prediction of the theory.

The mean value of image motion in zenith reduced to the objective diameter 20 cm for all places (photographic observations) is 0.36 (± 0.02). For visual observations it is 1.2 (± 0.1).

It is proposed to take this values as some standards for the objectives of 20 cm diameters.