

УДК 520.16

Исследование астроклимата на пике Терскол

Н. Н. Перетятко

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
03680, МСП, Київ-127, Голосіїв

Розглядаються результати спостережень астроклімату на піку Терскол (Півн. Кавказ) з 1988 по 1991 рр. Вимірювання проводилися за допомогою інтерферометра когерентності. Значення ширини зображення зірки на $\lambda = 0.5$ мкм становить $FWHM \approx 1.2''$ для 50 % кращого спостережного часу. Доля спостережного часу з хмарністю не більше ніж 2 бали склала 16 % від усього врахованого часу спостережень, що дорівнює 857 год. Значення $\beta_{\text{атм}}$ для піку Терскол зрівнюються з результатами для КраО (Крим), САО РАН (Півн. Кавказ), пп. Майданак і Санглок (Середня Азія). Повторюваність значень $\beta_{\text{атм}} \leq 0.6''$ при хмарності не більше ніж 2 бали у різний час складає 0...4.2 %.

ИССЛЕДОВАНИЕ АСТРОКЛИМАТА НА ПИКЕ ТЕРСКОЛ, ПЕРЕТЯТКО Н. Н. — Рассматриваются результаты наблюдений астроклимата на пике Терскол (Сев. Кавказ) с 1988 по 1991 гг. Измерения проводились с помощью интерферометра когерентности. Значение ширины изображения звезды на $\lambda = 0.5$ мкм составило $FWHM \approx 1.2''$ для 50 % лучшего наблюдательного времени. Доля наблюдательного времени при облачности не более 2 баллов составила 16 % от всего учтенного времени наблюдений, равного 857 ч. Значения $\beta_{\text{атм}}$ для пика Терскол сравнены с результатами для КраО (Крым), САО РАН (Сев. Кавказ), пп. Майданак и Санглок (Средняя Азия). Повторяемость значений $\beta_{\text{атм}} \leq 0.6''$ при облачности не более 2 баллов в различные сроки составляет 0...4.2 %.

RESEARCH OF ASTROCLIMATE INVESTIGATION AT PEAK TERSKOL, by Peretyatko N. N. — We examine results of astroclimate observations carried out at Peak Terskol (the North Caucasus) from 1988 to 1991. The measurements were made with a coherent interferometer. The seeing at the Terskol site is characterized by the $FWHM \approx 1.2''$ at the wavelength $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ for 50 % of the best observation time. The observation time with a cloud amount of 2 or less made 16 % from all observation time, which amounts to 857 hours. The parameter β_{atm} for Peak Terskol is compared to the results obtained by different authors by similar methods for the Crimean Astrophysical Observatory, SAO of the Russian Academy of Sciences (the North Caucasus), Maidanak and Sanglok (Central Asia). The recurrence of $\beta_{\text{atm}} \leq 0.6''$ under a clouds amount of ≤ 2 was estimated. This recurrence fluctuated in the interval 0...4.2 % at the different periods.

ВСТУПЛЕНИЕ

Целью проводимых на пике Терскол исследований было получение ночной астроклиматической характеристики места. Оценивались размер изображения звезд, которые мог бы построить большой (≥ 2 м) идеальный телескоп, а также облачность по 10-балльной шкале. Эти данные необходимы для оценки возможностей предполагаемого инструмента в данном пункте, для планирования наблюдений, а также правильного конструирования возможных адаптивных элементов, для улучшения разрешения.

Последние годы большинство исследователей оценку размера изображения звезд определяют мерой качества видения — полной шириной изображения (в секундах дуги) на половине максимума ($FWHM$, или β_{50} , или $\beta_{атм}$). При условии развитой турбулентции, подчиняющейся закону 2/3 Колмогорова—Обухова [14], эта мера выражается простым соотношением $\beta_{атм} \approx 10.1''/r_0$ для $\lambda = 500$ нм, где параметр Фрида r_0 , см — характерный размер участка когерентности плоской волны в плоскости входного зрачка телескопа.

Есть разные способы нахождения $\beta_{атм}$ и r_0 , однако ни один из них не является универсальным. Сложности экспедиционных условий заставляют исследователя вводить различные ограничения и предположения о плотных слоях атмосферы. Для решения поставленной задачи нами выбрана методика А. А. Токовина с использованием интерферометра когерентности (ИК) [7,15,16].

Данный метод позволяет прямо найти контраст интерференционных полос, который связан с функцией когерентности, определяющей качество изображения. Необходимо отметить, что интерференционные полосы могут искажаться не только атмосферой, но и дефектами оптики питающего телескопа. Однако атмосфера вызывает дрожание полос, замывающее их на фотографии, а оптика дает лишь постоянное искривление, не снижающее контраст на ровных участках фотореplik (если искажения оптической поверхности имеют большой пространственный период). Учитывая, что оптика телескопов приемлемо неплоха, а большие постоянные искажения интерференционной картинки можно обойти при измерениях контраста, то можно утверждать, что ошибки оптики телескопа сказываются слабо, и результаты, полученные на разных телескопах, сравнимы в пределах ошибок измерений.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА И ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оптическая часть прибора для получения и фотографирования интерференционных полос, состоит из объектива, фильтра ЖС-4 (или ЖС-11), зеркала Ллойда, узла визирования и кассетной части для астрофото пленки. Плоскость выходного зрачка телескопа, переданная объективом интерферометра, рассекается зеркалом Ллойда пополам. Обе половины интерферируют, и полосы интерференции на месте выходного люка регистрируются астрофото пленкой А 600-Н. Пленка чувствительна к водороду в Государственном институте им. Штернберга Т. А. Бирулей [2]. Начиная с сентября 1989 г., регистрация интерференционной картины производилась на пленке КН-4С, которая по своим параметрам «чувствительность—шум» заметно уступает А600-Н. На пленку вместе с интерференционной картиной наносились калибровочные метки в виде марок почернения от фотометра (напоминающего трубчатый прибор Йеркской обсерватории [11, с. 383]) с 14 отверстиями от 0.48 до 5.08 мм. Экспозиция марок почернения соответствовала экспозиции выбранных объектов. Пленки проявлялись в мелкозер-

нистых проявителях УП-2М (6 мин) и в MWP-2 (12 мин) и обрабатывались закрепителем БКФ-7 (15 мин.). Измерение снимков производилось на двухкоординатном модернизированном фотометре АМФ-2 (разработки С. И. Приходько) и на АКОИПО (разработки В. Г. Парусимова) с шагом 8 мкм поперек интерференционной картины. Запись параметров контраста в цифровом виде осуществлялась на магнитную ленту. Ширина щели составляла 0.04 мм для АМФ-2 и 0.03 мм для АКОИПО, т. е. примерно 0.01 часть периода интерференционной полосы, при 20-кратном увеличении и длине щели 5—8 мм, скорости движения каретки 30 мкм/с, частоте считывания 16 Гц. Для обработки снимки отбирались по критерию $0.2 \leq \gamma \leq 0.5$ (здесь $|\gamma(x)| = \exp[-3.44(x/r_0)^{5/3}]$). Каждый снимок на местах с минимальными дефектами интерференционной картины от 3 до 6 раз фотометрировался, и результаты по нему усреднялись. Первоначально данные были обработаны С. В. Войтой (1992 г.), затем автором все полученные результаты от разных звездных объектов приведены к зениту (1995 г.) и представлены в настоящей работе. Использовался метод сглаживания кривой контраста [17, 19].

Интерферометр когерентности разрабатывался с учетом наблюдений за Полярной звездой, зенитное расстояние которой почти неизменно. Тем самым удается исключить влияние возможных нежелательных колебаний монтировки телескопа за счет отключения ее ведения после настройки на объект. Небольшие угловые перемещения Полярной направлены в приборе вдоль края зеркала Ллойда, и поэтому за время экспозиции (1—1.5 мин) практически не влияют на смещение интерференционных полос. Однако довольно часто Полярная звезда экранируется гладким облаком яйцеобразной формы, закрывающем участок неба вблизи вершины Эльбруса примерно на 2 %, при этом все остальное небо остается полностью ясным. Поэтому большая часть наблюдений выполнена по Арктуру, Капелле и Веге при зенитном расстоянии менее 50° и времени экспозиции 15—30 с.

Оценка закрытия неба облачностью проводилась визуально с помощью небольших экранов (масок) по 10-балльной шкале ежедневно.

Интерферометр когерентности был установлен на 60-см телескопе фирмы «Карл Цейс». Маленькое помещение (180 м³) не обогревалось. Купол и входные двери открывались как минимум за один час до наблюдений. Разница температур между подкупольным и наружным пространством не превышала для летне-осеннего времени 2°C, а для зимнего 5°C. Для уменьшения воздействия ветра на инструмент звезды выбирались так, чтобы телескоп был защищен куполом.

Фиксирование результатов проводилось в течение каждого часа ночного и сумеречного времени. Делалось по три контрольных снимка, которые при

Таблица 1. Основные результаты наблюдений ночного астроклимата на пике Терскол с помощью прибора ИК

Но- мер сезона	Период наблюдений ИК	Общее время наблюдений, ч	Доля ясного времени (0 баллов), %	Доля ясного времени (≤ 2 баллов), %	Доля времени с облачно- стью 9— 10 бал- лов, %	r_0 , см	$\beta_{\text{атм}}$
1	27.08—19.09.1988	200	14	19	66	8.4	1.2'
2	09.09—20.09.1989	120	21	31	43	6.3	1.6
3	17.02—11.03.1990	230	19	26	61	данные утеряны	
4	25.08—14.09.1990	172	8	35	51	8.4	1.2
5	05.03—22.03.1991	170	9	27	56	8.4	1.2
6	06.12—26.12.1991	195	28	47	28	10.1	1.0

Примечание: относительная ошибка определения r_0 и $\beta_{\text{атм}}$ не превышает 20 %

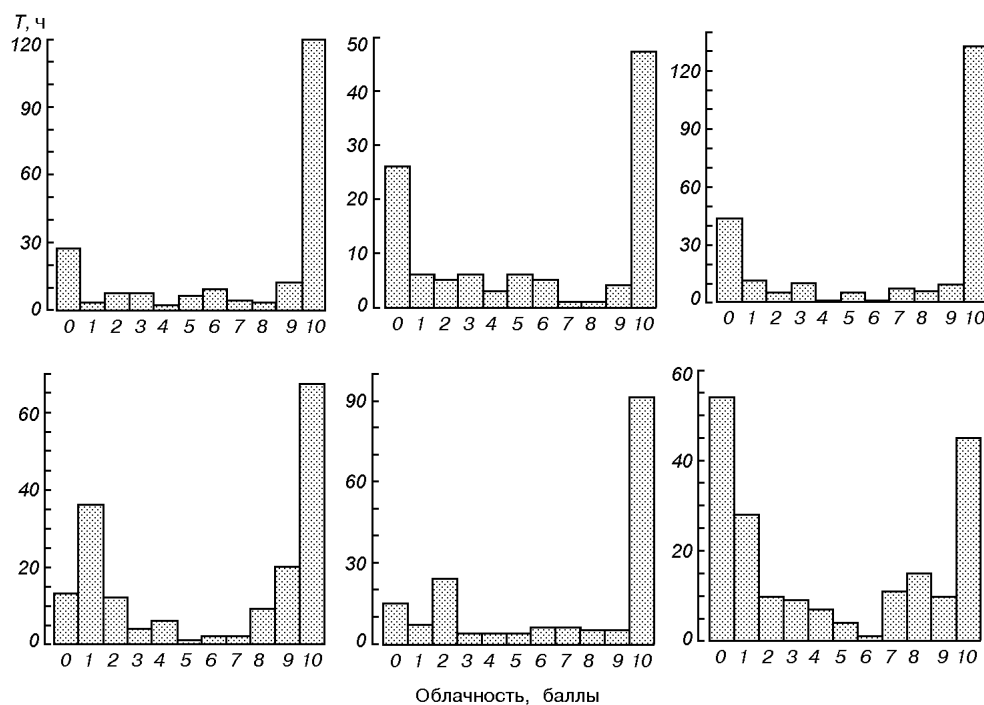


Рис. 1. Гистограммы облачности на пике Терскол для шести сезонов

обработке усреднялись. В табл. 1 приведены: общее время ночных наблюдений для каждого сезона, доля времени с облачностью 0 баллов (небо закрыто менее чем на 5%), 2 балла ($\leq 25\%$) и 9—10 баллов ($\geq 85\%$); медианные значения r_0 и $\beta_{\text{атм}}$ для ясного ночного времени.

Гистограммы облачности по 10-балльной шкале для шести сезонов представлены на рис. 1. Величина облачности до 2 баллов и свыше 8 баллов оценивалась точнее, чем средняя часть шкалы. Интегральное распределение наблюдательного времени по величине $\beta_{\text{атм}}$ приведено на рис. 2 для разных сезонов наблюдения. Величины $\beta_{\text{атм}}$ получены путем приведения к зениту

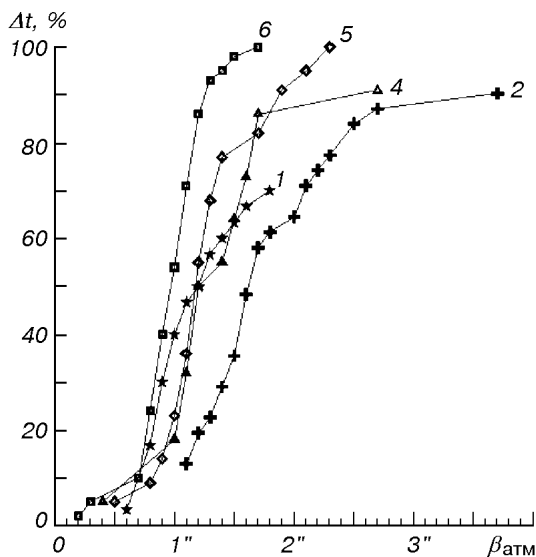


Рис. 2. Интегральное распределение времени, когда диаметр изображения не превышал $\beta_{\text{атм}}$, полученные с помощью интерферометра когерентности для сезонов 1—6

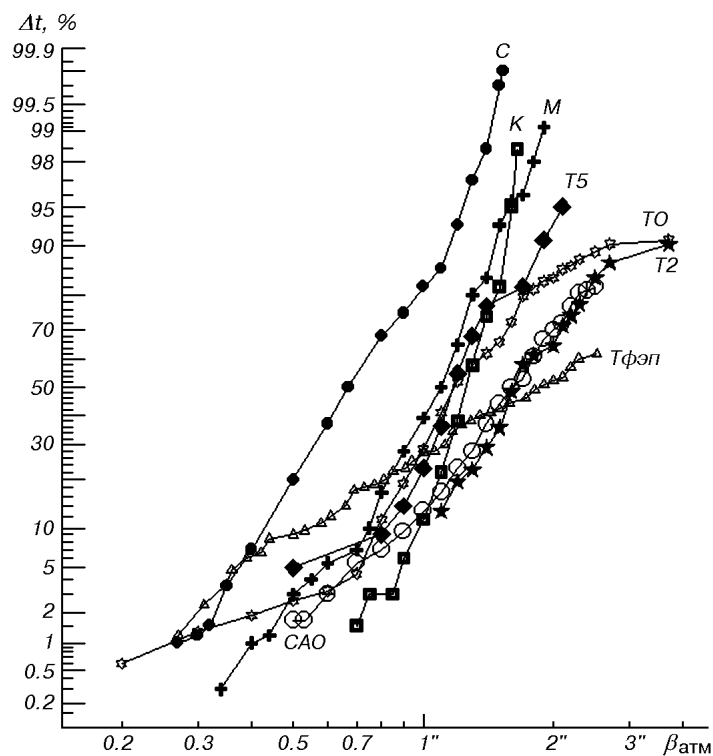


Рис. 3. То же, что на рис. 2 для разных астропунктов: К — Крым (ГАИШ); М — гора Майданак; С — гора Санглок; CAO — CAO РАН; T5, T2 и T0 — лучшие, худшие и обобщенные данные для пика Терскол; ТФЭП — данные наблюдений на п. Терскол с помощью ФЭП 15.02—19.04.1987 г.

величин $\beta_{\text{атмz}}$, полученных на зенитном расстоянии ζ_1 :

$$\beta_{\text{атм}} = \beta_{\text{атмz}} \sqrt{\cos \zeta_1}.$$

Суммарное время наблюдений в часах по каждому сроку $\sum T_{\text{наб}}$ приравнивается 100 %. Каждая точка на графике показывает долю времени с качеством изображения не хуже чем $\beta_{\text{атм}}$ при облачности не более 2 баллов. На рис. 3 приведены такие же интегральные распределения для разных пунктов наблюдений, полученные с помощью прибора ФЭП. Астропункт Санглок представлен преимущественно сезонами в августе и октябре с 1979 по 1985 гг. (103 ночи), Майданак — средними по трем сезонам 1977—1978 гг. (64 ночи), Крым (ГАИШ) — тремя сезонами в июне—августе 1979—1980 гг. (46 ночей), CAO РАН (Северный Кавказ) — данными за 10—26 августа 1984 г. (10 ночей) [18]. Для п. Терскол представлены худший (T2) и лучший (T5) сезоны, а также приводятся обобщенные данные (T0), полученные на интерферометре когерентности. Показания Тфэп, полученные в 1987 г. [12], приведены к зениту с учетом облачности не более 2 баллов. Сравнимость результатов ФЭП и ИК неоднократно подтверждалась в работах [4, 5, 7].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Гистограммы облачности на пике Терскол имеют достаточно распространенный U-образный характер с превышением по времени облачности более высоких баллов. Только декабрь 1991 г. (сезон 6) явился исключением с явным преобладанием ясного ночного времени, однако практически весь этот период, за исключением 4-5 ночей, наблюдалась сильная дымка. Поэтому мы не причисляем этот сезон к числу наилучших и не приводим его на рис. 3. (С одной стороны, наличие в атмосфере большого количества аэрозоля и водяных паров сопровождается заметным улучшением качества

Таблица 2. Повторяемость оценок размеров изображений звезд $\beta_{\text{атм}} \leq 0.6''$ для различных сроков наблюдений

Номер сезона	Доля изображений не хуже $0.6''$, %	Доля ясного неба (≤ 2 баллов)	Повторяемость оценок, %
1	3	0.19	0.6
2	0	0.31	0
4	9	0.35	3.2
5	6	0.27	1.6
6	9	0.47	4.2
ТфЭп	12	0.26	3.1

изображения, но с другой — приводит к сильному ослаблению света, так что эффективность телескопа остается очень низкой). Тем не менее, данные для сезона 6 вошли в обобщенную кривую ТО.

Из рис. 3 видно, что наилучшие изображения на пике Терскол (Т5), полученные в сроки короче 1 мес., уступают изображениям для г. Майданак и г. Санглок. Кривая качества, полученная с помощью ФЭП за 2 месяца, имеет заметно больший наклон, что указывает на ухудшение среднего качества изображения при рассмотрении большего срока непрерывных наблюдений. В то же время для Майданака за период более одного года с использованием измерителя дифференциальных дрожаний (DIMM) Европейской Южной обсерватории получены более стабильные данные [6].

Умножая найденные значения доли изображений звезд $\beta_{\text{атм}} < 0.6''$ на долю ясного времени с облачностью, не превосходящей 2 балла, мы определили повторяемость лучших оценок качества для каждого сезона наблюдений (табл. 2).

ВЫВОДЫ

Использованные нами приборы ИК (разработки А. А. Токовина) и ФЭП (разработки П. В. Щеглова) показали высокую надежность в экспедиционных условиях при исследовании атмосферной нестабильности в видимом диапазоне волн, и с учетом некоторых замечаний [3] с ними можно работать и в дальнейшем. Даже в фотографическом варианте для тех мест, где нет электросети, прибор ИК в сочетании с телескопом $D \geq 60$ см вполне может применяться по Полярной звезде.

Мы получили основные характеристики возможных изображений для большого телескопа на пике Терскол в предположительно лучшие периоды сезонных наблюдений. Оказалось, что они уступают данным для г. Санглок и г. Майданак, одних из лучших астропунктов в мире [3, 6, 7, 18], и практически идентичны показателям для САО РАН (Северный Кавказ). Изображения высокого класса ($\beta_{\text{атм}} \leq 0.6''$) для пика Терскол относительно редкие, но при этом имеются ночи с высокой прозрачностью. Средние значения коэффициента экстинкции по эпизодическим наблюдениям составляют $\alpha_U = 0.55^m$, $\alpha_B = 0.30^m$, $\alpha_V = 0.22^m$ [8, 13], а лучшие — 0.36^m , 0.18^m и 0.11^m соответственно, что даже превосходит лучшие значения для Серро-Тололо (0.50^m , 0.26^m и 0.13^m) [8].

Применение для построенного 2-м телескопа адаптивных систем I рода [1], очевидно, нецелесообразно, так как медианные значения радиуса когерентности слишком малы ($6.3 < r_0 < 10.1$ см), а их повторяемость составляет всего $50\% \times 0.31 = 15.5\%$ и $50\% \times 0.47 = 23.5\%$). Известно [9, 10], что для достижения наземным телескопом разрешения, близкого к

дифракционному, для составных зеркал необходимо выбирать размер сегмента равным не более $3r_0$. Для того, чтобы система эффективно работала хотя бы 10 % лучшего наблюдательного времени, (при $\beta_{\text{атм}} \approx 0.8''$, $r_0 \approx \approx 13$ см), необходимо не меньше 36 сегментов для 2-м телескопа. По сегодняшним технологиям это будет очень дорого при малой конечной эффективности.

1. Баранов Ю. В., Новиков С. Б., Овчинников А. А. Улучшение разрешения телескопа с помощью компенсатора наклонов волнового фронта // Атмосферная нестабильность и адаптивный телескоп. — Л.: Наука, 1988.—С. 25—27.
2. Бируля Т. А., Докучаева О. Д., Кузнецов А. Е. и др. Опыт гиперсенсibilизации пластинок ORWO ZU-21 нагреванием их в водороде // Астрон. циркуляр.—1985.—№ 1375.—С. 4—8.
3. Бугаенко О. И., Дудинов В. Н., Новиков С. Б. и др. Результаты исследования астроклимата Майданакской обсерватории ГАИШ зеркальным интерферометром Ллойда с ПЗС-приемником. — М.: ГАИШ, 1992.—С. 3—21.—(Препринт / Майданакская обсерватория, № 22).
4. Гурьянов А. Э., Пекур М. С., Иркаев Б. Н. и др. Сравнение интерферометра когерентности и фотоэлектрического прибора ФЭП // Астрон. циркуляр.—1986.—№ 1467.—С. 1—3.
5. Гурьянов А. Э., Зубковский С. Л., Токовинин А. А. и др. Сравнение астроклиматических приборов на горизонтальной трассе // Астрон. циркуляр.—1983.—№ 1291.—С. 1—4.
6. Ильясов С. П., Байжуманов А. К., Сарацин М. и др. Измерение качества ночного изображения на горе Майданак с помощью монитора дифференциальных дрожаний Европейской Южной обсерватории // Письма в Астрон. журн.—1999.—25, № 2.—С. 156—160.
7. Ильясов С. П., Кутырев А. С., Токовинин А. А., Щеглов П. В. Измерения параметров атмосферного качества изображения на горе Майданак с помощью интерферометра когерентности и фотоэлектрического прибора. — М.: ГАИШ, 1992.—С. 3—22.—(Препринт / Майданакская обсерватория, № 21).
8. Комаров Н. С., Депенчук Е. А., Чуприна Р. И. Астроклиматические характеристики пика Терскол. Монохроматический коэффициент экстинкции // Астрометрия и астрофизика.—1975.—Вып. 24.—С. 115—119.
9. Коняев П. А., Лукин В. П., Фортес Б. В. Фазовая коррекция нелинейных искажений лазерного пучка на вертикальной атмосферной трассе // Оптика атмосферы.—1990.—3, № 12.—С. 1279—1285.
10. Коняев П. А., Лукин В. П., Фортес Б. В. Эффективность гибкого и составного зеркал в задаче коррекции турбулентных искажений волнового фронта // Оптика атмосферы и океана.—1992.—5, № 12.—С. 1324—1328.
11. Курс астрофизики и звездной астрономии / Под ред. А. А. Михайлова. — М., Л.: ГОИ технико-теор. лит.-ры, 1951.—Т. 1.—592 с.
12. Перелятко Н. Н., Кутырев А. С., Щеглов П. В. Фотоэлектрические измерения атмосферного дрожания на пике Терскол // Астрон. циркуляр.—1987.—№ 1514.—С. 6—8.
13. Пугач А. Ф., Кондратюк Р. Р., Розенбуш А. Э. Определение коэффициентов атмосферного поглощения на пике Терскол и исследование инструментальной системы фотометра // Астрометрия и астрофизика.—1975.—Вып. 25.—С. 111—114.
14. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. — М.: Наука, 1967.—548 с.
15. Токовинин А. А. Интерферометр для определения частотно-контрастной характеристики атмосферы // Письма в Астрон. журн.—1978.—4, № 9.—С. 425—428.
16. Токовинин А. А. Интерферометр когерентности с зеркалом Ллойда для измерения качества изображения // Астрон. циркуляр.—1985.—№ 1356.—С. 4.
17. Уиттекер Э., Робинсон Г. Математическая обработка результатов наблюдений. — Л.-М.: Гос. тех.-теор. издат, 1933.—364 с.
18. Щеглов П. В., Гурьянов А. Э. Об атмосферном качестве астрономического изображения в некоторых пунктах СССР // Астрон. журн.—1991.—68, вып. 3.—С. 632—638.
19. Vondrak J. A contribution to the problem of smoothing observational data // Bull. Astron. Inst. Czech.—1969.—20, N 6.—P. 349—355.

Поступила в редакцию 11.05.00