ИССЛЕДОВАНИЕ АСТРОКЛИМАТА 2-м ТЕЛЕСКОПА НА ПИКЕ ТЕРСКОЛ

В. Н. Андрук[1], Г. З. Бутенко[2], В. И. Кузнецов[2], С. Ф. Носов[1], В. Г. Парусимов[1], Н. Н. Перетятко[1], А. В. Сергеев[2], Л. И. Снежко[3]

[1] *Главная астрономическая обсерватория НАН Украины*
ул. Академика Заболотного, 27, 03680 Киев, Украина
e-mail: andruk@mao.kiev.ua

[2] *Международный центр астрономических и медико-экологических исследований*
ул. Академика Заболотного, 27, 03680 Киев, Украина
e-mail: butenko@mao.kiev.ua

[3] *Специальная астрофизическая обсерватория РАН*
пос. Нижний Архыз, Зеленчукский район, 369167 Карачаево-Черкесская Республика, Россия
e-mail: snezhko@sao.ru

На основе обширного наблюдательного материала, полученного в 1985–1991 и 1997 гг. на телескопах, установленных на пике Терскол, приводятся коэффициенты экстинкции в полосах $UBVRI$ системы Джонсона, яркость свечения ночного неба, значение функции $FWHM$ качества изображения звезды в телескопе, распределение ошибок электро- и ПЗС-фотометрии, другие данные. Специальные наблюдения на 2-м телескопе с диафрагмой Гартманна в 1998–2001 гг. позволили исследовать астроклимат трубы и подкупольного помещения, оценить качество получаемых изображений, выработать рекомендации по реализации проницающей силы 2-м телескопа.

INVESTIGATION OF THE SEEING FOR THE 2–m TELESCOPE AT TERSKOL PEAK, by Andruk N. V., Butenko G. Z., Kuznetsov V. I., Nosov S. F., Parusimov V. G., Peretyatko N. N., Sergeev A. V., Snezhko L. I. – We derived the extinction coefficients in the $UBVRI$ bands of the Johnson system, together with the night-sky luminosity, the $FWHM$ function of star images, the distribution of the photomultiplier, the errors of CCD-photometry, as well as other data calculated from extensive observations in 1985–1991 and 1997 with the telescopes mounted on Terskol Peak. The specially arranged observations obtained in 1998–2001 with the 2-m telescope equipped with a Hartmann diaphragm allowed us to study the seeing contribution of the tube and of the air mass inside the dome, to estimate star image quality, and to make recommendations how to reach the limiting resolution of the 2-m telescope.

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа основана на результатах оригинальных измерений, выполненных авторами на пике Терскол в рамках различных наблюдательных программ с целью определения условий наблюдений в астропункте пик Терскол вообще и качества получаемых на 2-м телескопе астрономических данных в частности. Длительные ряды фотоэлектрических наблюдений звезд позволили не только определить макропараметры астроклимата пика Терскол (прозрачность атмосферы для пяти полос $UBVRI$ системы Джонсона, яркость свечения ночного неба, прочее), но и впервые установить факт изменения коэффициентов экстинкции, связанный с приливными эффектами в атмосфере Земли от Луны и Солнца. Микроастроклимат 2-м телескопа исследовался на основе анализа большого количества просканированных и обработанных кадров изображений звезд с диафрагмой Гартманна. Получены численные значения аберраций оптической системы в фокусе Кассегрена: постоянная кома, сферическая аберрация, астигматизм. Выработаны и реализованы многочисленные рекомендации по эффективному использованию возможностей 2-м телескопа.

АСТРОКЛИМАТ ПИКА ТЕРСКОЛ

1. Специальные наблюдения астроклимата пика Терскол в 1987–1991 гг. с помощью интерферометра когерентности и ФЭП дали следующие результаты [6, 7]. Было установлено, что значение ширины изображения звезды $FWHM = 1.2''$ (функция $FWHM$ или β_{50}-оценка размера изображения звезды на половине максимума интенсивности) на длине волны $\lambda = 0.5$ мкм характерно для 50 % лучшего наблюдательного времени. Значения β_{50} для астропункта Терскол уступают данным для г. Санглок (2237 м, Таджикистан) и г. Майданак (2760 м, Узбекистан) и практически идентичны показателям для САО РАН. Изображения высокого класса ($\beta_{50} \leq 0.6''$) для пика Терскол относительно редкие, но при этом бывают ночи с высокой прозрачностью. Следующий результат – доля наблюдательного времени при облачности не более 2 баллов (небо закрыто менее чем на 25 %) составляет в среднем 31 % за все 1734 ч наблюдений в сроки 15.02–19.04.1987, 27.08–19.09.1988, 09.09–20.09.1989, 17.02–11.03.1990, 25.08–14.09.1990, 05.03–22.03.1991, 06.12–26.12.1991.

2. На основе многолетних наблюдений в рамках программы МЕГА (1985–1991 гг.) с электрофотометром АЭФ-2 на телескопе Zeiss-600 в разные сезоны было установлено, что главные коэффициенты экстинкции k в системе $UBVR$ Джонсона для пика Терскол связаны с температурой T(°C) следующим образом [1]:

$$\begin{aligned} k_U &= 0.447^m + 0.00123^m\,T + 0.00082^m\,T^2, \\ k_B &= 0.241^m + 0.00321^m\,T + 0.00053^m\,T^2, \\ k_V &= 0.158^m + 0.0033^m\,T + 0.00045^m\,T^2, \\ k_R &= 0.106^m + 0.00319^m\,T + 0.00021^m\,T^2. \end{aligned} \tag{1}$$

Разброс коэффициентов экстинкции характеризуется следующими значениями: $\delta\,k_U = \pm 0.104^m$, $\delta k_B = \pm 0.078^m$, $\delta k_V = \pm 0.044^m$, $\delta k_R = \pm 0.043^m$. На рис. 1 значения коэффициентов экстинкции для отдельных ночей показаны точками, а сплошные линии соответствуют числовым значениям уравнений (1). Наблюдения поздней осенью 1991 г. на двухканальном электрофотометре ФОРАС позволили впервые определить коэффициент экстинкции k_I для инфракрасной полосы I системы Джонсона. По результатам обработки пяти ночей среднее значение поглощения в этой полосе равно $k_I = 0.30^m$.

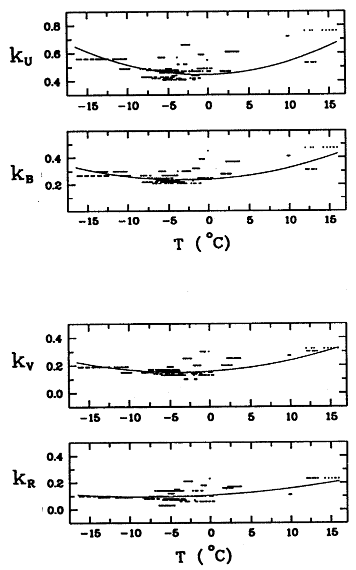

Рис. 1. Изменения главных коэффициентов экстинкции k_U, k_B, k_V, k_R с температурой T (°C) для безлунных ночей в астропункте Терскол

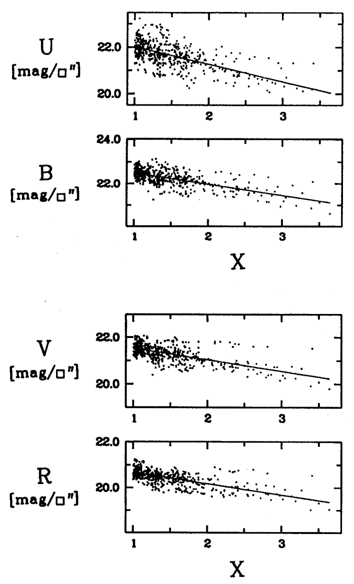

Рис. 2. Поверхностная яркость ночного безлунного неба в четырех полосах системы $UBVR$ в зависимости от воздушной массы X для астропункта Терскол

3. На основе измерений фона для бедных звездами областей ночного неба определены значения астрономической яркости (яркость фона неба на верхней границе атмосферы) и значения яркости на нижней границе атмосферы (в звездных величинах с одной квадратной секунды дуги). Для астропункта Терскол зависимости поверхностной яркости свечения ночного безлунного неба от воздушной массы X для четырех полос U, B, V, R имеют вид

$$U_{\square''} = 22.77^m - 0.75^m\,X, \qquad V_{\square''} = 22.11^m - 0.57^m\,X,$$
$$B_{\square''} = 23.02^m - 0.52^m\,X, \qquad R_{\square''} = 21.25^m - 0.57^m\,X. \tag{2}$$

Разбросы этих значений для безлунных ночей характеризуются величинами: $\delta U_{\square''} = \pm 0.435^m$, $\delta B_{\square''} = \pm 0.290^m$, $\delta V_{\square''} = \pm 0.273^m$, $\delta R_{\square''} = \pm 0.240^m$ (в звездных величинах на квадратную секунду дуги).

Наблюдения выполнены с двумя диафрагмами ($22''$ и $54''$ соответственно), что повышает достоверность результатов в систематическом отношении. На рис. 2 представлены зависимости поверхностной яркости ночного безлунного неба в четырех полосах от воздушной массы X для астропункта Терскол. Точки соответствуют отдельным определениям этих значений в разных областях неба, бедных звездами, в разные ночи; сплошные линии соответствуют числовым значениям уравнений (2).

4. Практическая точность фотометрических измерений звезд на пике Терскол для четырех полос $UBVR$ системы Джонсона приведена в таблицах. В табл. 1 представлены значения средних квадратичных ошибок σ, которые характеризуют фотоэлектрические наблюдения, выполненные на телескопе Zeiss-600 ($D/F = 60/750$).

Таблица 1. Средние значения СКО в зависимости по внешней сходимости от звездной величины для фотоэлектрического способа измерения величин звезд в системе $UBVR$ на телескопе Zeiss-600

V	σ_U	σ_B	σ_V	σ_R
5–6^m	0.009^m	0.009^m	0.009^m	0.006^m
6–7	0.005	0.006	0.006	0.006
7–8	0.008	0.006	0.006	0.006
8–9	0.006	0.006	0.006	0.009
9–10	0.009	0.008	0.008	0.010
10–11	0.011	0.012	0.010	0.013
11–12	0.019	0.016	0.018	0.024
12–13	0.034	0.020	0.024	0.033
13–14	0.048	0.033	0.040	0.060
14–15	0.081	0.058	0.069	0.096
15–16	0.154	0.079	0.106	–

Обработка ПЗС-наблюдений, выполненных на 2-м телескопе с помощью двухканального фокального редуктора (Институт аэрономии общества Макса Планка, Линдау, Германия), позволила получить распределение средних значений СКО единичного измерения экваториальных координат и звездных величин [2]. Эти данные приводятся в табл. 2 и табл. 3. Обработка ПЗС-кадров изображений сделана в пакете MIDAS/ROMAFOT, из расчетов получены размеры пикселя для оптической системы редуктора, установленного на 2-м телескопе ($0.9943'' \pm 0.015''$, $0.8116'' \pm 0.006''$ для синего и красного каналов соответственно).

5. Как показала практика фотоэлектрических наблюдений звезд на высокогорном астропункте Терскол, для получения высокоточных фотометрических измерений блеска небесных объектов необходимо учитывать пространственно-временные изменения экстинкции, связанные с полусуточными вариациями физического состояния атмосферы Земли из-за приливных воздействий Солнца и Луны. То есть, при длительных наблюдениях в течение ночи, кроме главных и цветовых коэффициентов экстинкции, необходимо учитывать дополнительное изменение поглощения γ_S и γ_M , которое представим в обычном виде [8]:

$$S = \gamma_S \sin(2\Delta\alpha_{IS} + \sigma_{\alpha S}) \cos(2\Delta\delta_{IS}),$$
$$L = \gamma_M \cos(2\Delta\alpha_{IM}) \sin(2\Delta\delta_{IM} + \sigma_{\alpha M}), \tag{3}$$

где $\Delta\alpha_{IS} = \alpha_I - \alpha_S = T_I - T_S$, $\Delta\alpha_{IM} = \alpha_I - \alpha_M = T_I - T_M$; α_I, α_S, α_M – прямые восхождения, а T_I, T_S, T_M – моменты прохождения через меридиан I-й звезды, Солнца и Луны соответственно; $\Delta\delta_{IS} = \delta_I - \delta_S = Z_I - Z_S$, $\Delta\delta_{IM} = \delta_I - \delta_M = Z_I - Z_M$; δ_I, δ_S, δ_M – склонения, а Z_I, Z_S, Z_M – зенитные расстояния для I-й звезды, Солнца и Луны соответственно; $\sigma_{\alpha S}$, $\sigma_{\alpha M}$ – фазовый угол для Солнца и Луны; $I = 1, 2, \ldots, N$, I – текущий номер звезды. На рис. 3 показано изменение главных коэффициентов экстинкции для четырех полос $UBVR$ системы Джонсона в зависимости от пространственного положения Луны, Солнца и Земли. Значению $\cos(ls) = 1$

Таблица 2. Средние значения "инструментальных" СКО единичного измерения координат и звездных величин, полученных на основе цифровой обработки ПЗС-наблюдений на ДФР (2-м телескоп системы Ричи–Кретьена–Кудэ обсерватории Терскол) для синего (B-полоса) и красного (V-полоса) каналов. Сравнивались две экспозиции – 20 и 180 с

Синий канал				Красный канал			
B	σ_α	σ_δ	σ_m	V	σ_α	σ_δ	σ_m
12–13^m	0.014″	0.048″	0.068^m	12–13^m	0.015″	0.040″	0.055^m
13–14	0.015	0.040	0.034	13–14	0.035	0.022	0.034
14–15	0.019	0.037	0.013	14–15	0.036	0.044	0.016
15–16	0.018	0.045	0.015	15–16	0.045	0.060	0.027
16–17	0.037	0.037	0.026	16–17	0.101	0.070	0.038
17–18	0.092	0.064	0.038	17–18	0.151	0.088	0.052
18–19	0.138	0.057	0.060	–	–	–	–

Таблица 3. Средние значения СКО по "внешней" сходимости единичного измерения экваториальных координат звезд, полученных на основе цифровой обработки ПЗС-наблюдений на ДФР для экспозиций 180 и 20 с (синий и красный канал)

Экспозиция 180 с			Экспозиция 20 с		
m	σ_α	σ_δ	m	σ_α	σ_δ
12–13^m	0.114″	0.064″	12–13^m	0.033″	0.033″
13–14	0.080	0.026	13–14	0.054	0.036
14–15	0.090	0.047	14–15	0.049	0.052
15–16	0.085	0.061	15–16	0.082	0.051
16–17	0.084	0.051	16–17	0.090	0.062
17–18	0.083	0.052	17–18	0.078	0.053
18–19	0.063	0.062	–	–	–
19–20	0.045	0.077	–	–	–
20–21	0.098	0.040	–	–	–

соответствуют сагиттальные приливы (Луна, Солнце и Земля на одной линии), средние значения непрозрачности атмосферы достигают максимального значения (ls – расстояние на небесной сфере между Луной и Солнцем). Этот результат получен и демонстрируется впервые по результатам фотоэлектрических измерений звезд на пике Терскол.

АСТРОКЛИМАТ 2-м ТЕЛЕСКОПА

1. Для аттестации оптической системы в фокусе Кассегрена и исследования астроклимата 2-м телескопа в 1998 и 1999 гг. были выполнены специальные наблюдения с диафрагмой Гартманна. Использовался метод совместной обработки двух гартманнограмм (полученных в предфокальных и зафокальных позициях). Предварительно все 273 снимка диафрагмы Гартманна были просканированы на автоматическом цифровом микрофотометре АЦМФ-XY [5], затем обработаны при помощи программного фотометрического пакета MIDAS/ROMAFOT в операционной системе LINUX. Использовался специальный способ предварительной коррекции оцифрованных изображений с широким динамическим диапазоном плотности почернения фотоэмульсии. Это позволило повысить точность и достоверность полученных данных. На рис. 4 показан вид диафрагмы Гартманна после обработки просканированных снимков в программном пакете MIDAS/ROMAFOT (вверху). Также демонстрируется возможность специального метода по разделению перекрывающихся участков дырок диафрагмы (внизу).

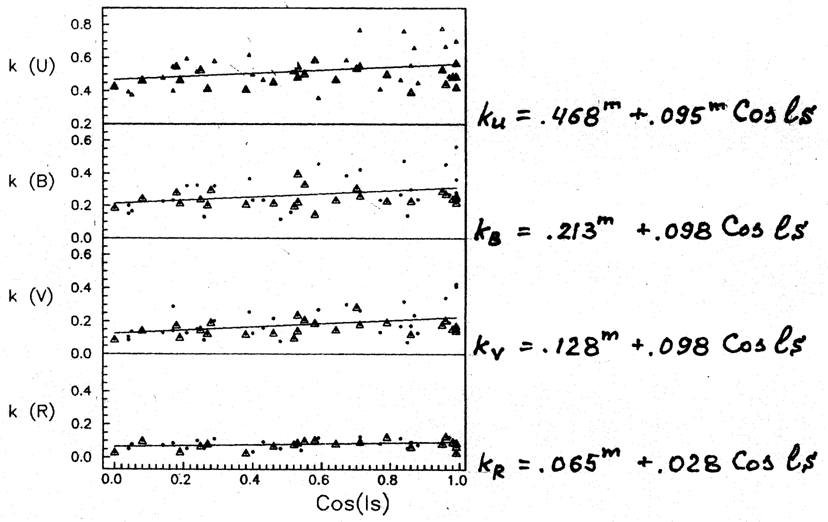

Рис. 3. Изменения главных коэффициентов экстинкции k_U, k_B, k_V, k_R для пика Терскол в зависимости от пространственного положения Луны, Солнца и Земли. Треугольники соответствуют безлунным ночам, значению $\cos(ls) = 1$ соответствуют сагиттальные приливы

По результатам исследования гартманнограмм 1998 года было установлено, что оптическая система фокуса Кассегрена 2-м телескопа является классической системой Ричи–Кретьена. Показано, что после выполнения дополнительных юстировочных работ может быть достигнуто качество изображения по всему полю $d_{0.8} = 0.7''$, что практически совпадает с данными цеховой аттестации [3]. Без выполнения юстировочных работ система с корректором астигматизма создавала изображение $d_{0.8} = 1.3''$, что не отвечает современным требованиям. Было указано на следующий приоритет работ на телескопе, обязательных для реализации его проницающей силы:

- Ввод в эксплуатацию штатных систем вентиляции подкупольного пространства и закрытой трубы телескопа, отработка режимов их работы, создание системы регистрации метеопараметров и температурного режима.
- Проведение дополнительных юстировочных работ для достижения качества изображения, ограниченного только расчетными аберрациями и уровнем ошибок изготовления.
- Промывка оптики телескопа для устранения накопленной запыленности.

2. На основе дополнительного обширного наблюдательного материала за 1999 г., полученного после промывки зеркал, продува подкупольного помещения и трубы 2-м телескопа, проведена окончательная аттестация оптики телескопа в фокусе Кассегрена на пике Терскол [4]. После исключения аберраций (кома, астигматизм, сферическая аберрация) можно достичь значения величины диаметра кружка рассеяния $d_{0.8} = 0.6''$ (при 80 % концентрации энергии). На рис. 5 (*а, б, в*) показан ход значений полевого астигматизма, комы и сферической аберрации в системе без корректора астигматизма; *г, д, е* – то же в системе с корректором.

Анализ обработки гартманнограмм показал, что с целью улучшения качества изображения и увеличения проницающей силы 2-м телескопа необходимо провести соответствующие юстировочные работы, которые по существу сводятся к устранению постоянной комы. В системе без корректора астигматизма параметры комы составляют $F_X = 7.34 \pm 0.83$ мм и $F_Y = -3.94 \pm 0.37$ мм, что соответствует подвижкам $\Delta X = 1.32 \pm 0.29$ мм и $\Delta Y = -0.68 \pm 0.40$ мм. При этом остаются незначительные аберрации, которые объясняются эффектом гнутия трубы 2-м телескопа. В системе с корректором астигматизма параметры комы принимают значения $F_X = 8.13 \pm 2.50$ мм и $F_Y = -4.25 \pm 1.50$ мм, что соответствует подвижкам $\Delta X = 1.38 \pm 0.42$ мм и $\Delta Y = -0.73 \pm 0.56$ мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При относительно малом количестве ясных наблюдательных ночей в лучшие месяцы года (31 % при облачности до 2 баллов) макропараметры астроклимата пика Терскол (прозрачность атмосферы, яркость свечения ночного неба, функция *FWHM*, ошибки фотометрии) практически идентичны показателям для САО РАН (число наблюдательных часов для САО составляет 1750–1800 ч

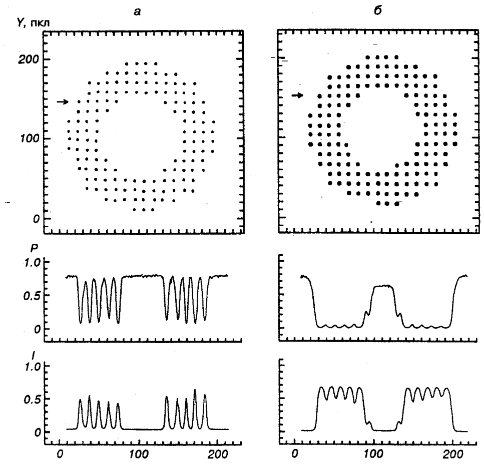

Рис. 4. Вид диафрагмы Гартманна после обработки снимков 15е, 16е в программном пакете MIDAS/ROMAFOT (вверху). Диаметры зачерненных кружков соответствуют шкале инструментальных величин ROMAFOT. Время экспонирования звезды α Lyr 0.2 с (*а*) и 20 с (*б*)

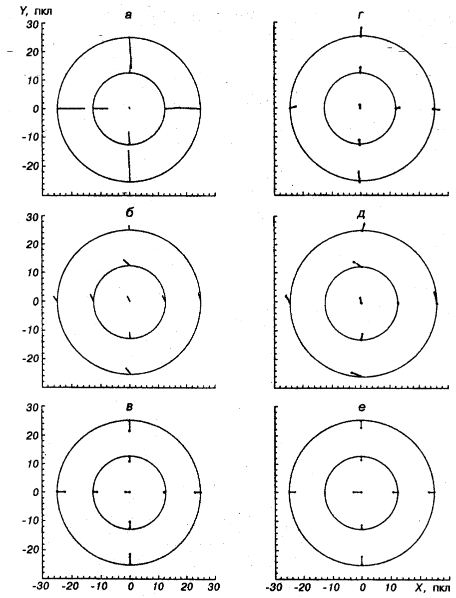

Рис. 5. *а, б, в* – полевой астигматизм, кома по полю и сферическая аберрация в системе без корректора в центре и на расстоянии $12.5'$ и $25'$ от центра; *г, д, е* – то же в системе с корректором

в год, т. е. около 45 %) и уступают данным для г. Санглок и г. Майданак. При соответствующем учете аберраций оптической системы 2-м телескопа можно достичь значения величины диаметра кружка рассеяния, равного $d_{0.8} = 0.6''$, что практически совпадает с данными цеховой аттестации 2-м телескопа. Выполнение точных фотометрических работ (электро- и ПЗС-фотометрия) на протяжении целой наблюдательной ночи требует тщательного измерения экстинкции для учета изменения прозрачности атмосферы Земли из-за приливных эффектов от Луны и Солнца.

[1] *Андрук В. Н.* Фотометрическая служба вблизи главного меридиана Галактики: наблюдения и создание каталога фотометрических стандартов звездных величин и цветов в системе UBVR // Кинематика и физика небес. тел.–1996.–**12**, № 4.–С. 60–73.

[2] *Андрук В. М., Парусімов В. Г., Дудник Т. Б.* Досвід цифрової обробки зображень зоряних полів у програмному пакеті MIDAS/ROMAFOT // Кинематика и физика небес. тел. Приложение.–1999.–№ 1.–С. 100–103.

[3] *Бутенко Г. З., Кузнецов В. И., Снежко Л. И.* Исследование оптики 2-м телескопа в фокусе Кассегрена на пике Терскол // Кинематика и физика небес. тел.–1999.–**15**, № 6.–С. 543–556.

[4] *Бутенко Г. З., Кузнецов В. И., Снежко Л. И. и др.* Исследование астроклимата и оптики 2-м телескопа на пике Терскол // Кинематика и физика небес. тел.–2001.–**17**, № 1.–С. 71–88.

[5] *Парусимов В. Г.* Автоматический цифровой двухкоординатный микрофотометр для ввода фотографических изображений в ЭВМ // Астрометрия и астрофизика.–1981.–Вып. 45.–С. 86–99.

[6] *Перетятко Н. Н.* Исследование астроклимата на пике Терскол // Кинематика и физика небес. тел.–2000.–**16**, № 5.–С. 470–476.

[7] *Перетятко Н. Н., Кутырев А. С., Щеглов П. В.* Фотоэлектрические измерения атмосферного дрожания на пике Терскол // Астрон. циркуляр.–1987.–№ 1514.–С. 6–8.

[8] *Чепмен С., Линдзен Р.* Атмосферные приливы термические и гравитационные.–М.: Мир, 1972.–295 с.