

УДК 524.62

И. Кулик¹, К. Йоккерс², Т. Креднер², Т. Бонев³¹ Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27² Институт Аэрономии общества им. Макса Планка
Макс-Планк-штрассе 2D-37191 Катленбург-Линдау, Германия³ Институт астрономии Болгарской академии наук
72 Тсариградско шассе, 1784 София, Болгария

Спектральная зависимость коэффициента экстинкции для пика Терскол

Представлены значения средних монохроматических коэффициентов атмосферной экстинкции на пике Терскол (Северный Кавказ) для спектрального интервала $\lambda\lambda = 360...953$ нм. Наблюдения были выполнены с ПЗС-матрицей на 2-м телескопе МЦАМЭИ с 1996 по 2002 гг. Полученные данные совместно с опубликованными ранее использовались для изучения временных вариаций аэрозольной составляющей атмосферной экстинкции. Не было обнаружено систематических многолетних изменений прозрачности атмосферы в течение исследуемого периода (1973—2002 гг.) Аэрозольная составляющая испытывает сезонные вариации; самая высокая замутненность атмосферы наблюдается для весеннего периода. Исследование спектральной зависимости коэффициентов экстинкции показывает, что аэрозольная составляющая в среднем следует закону $\propto \lambda^{-\alpha}$ с параметром α , принимающим значения 0.9, 1.2 и 2.2 для весеннего, летнего и осеннего сезонов соответственно. Среднее значение $\alpha = 1.4$ характеризует пик Терскол как астропункт с хорошей атмосферной прозрачностью.

СПЕКТРАЛЬНА ЗАЛЕЖНІСТЬ КОЕФІЦІЄНТА ЕКСТИНКЦІЇ ДЛЯ ПІКУ ТЕРСКОЛ, Кулик І., Йоккерс К., Креднер Т., Бонев Т. — Наводяться значення середніх монохроматичних коефіцієнтів атмосферної екстинкції на піку Терскол (Північний Кавказ) для спектрального інтервалу $\lambda\lambda = 360...953$ нм. Спостереження виконувались із ПЗС-матрицею на 2-м телескопі МЦАМЕД у 1996—2002 рр. Отримані дані спільно із опублікованими раніше використано для вивчення варіацій з часом аерозольної складової атмосферної екстинкції. Не було виявлено систематичних багаторічних змін прозорості атмосфери протягом досліджуваного відрізка часу (1973—2002 рр.). Аерозольна складова екстинкції зазнає сезонних змін; найвища забрудненість атмосфери спостерігається для весняного сезону. Дослідження спектральної залежності коефіцієнтів екстинкції виявляє, що аерозольна складова розсіяння в середньому відповідає залежності $\propto \lambda^{-\alpha}$ з параметром α , що набуває значень 0.9, 1.2 і 2.2 для весняного, літнього та осіннього періодів спостережень. Середнє значен-

ня $\alpha = 1.4$ характеризує пік Терскол як астропункт з досить хорошою атмосферою прозорістю.

THE WAVELENGTH DEPENDENCE OF THE MONOCHROMATIC EXTINGUISHION COEFFICIENT FOR THE OBSERVATORY ON TERSKOL PEAK, by Kulyk I., Jockers K., Credner T., Bonev T. — We present values of mean monochromatic extinction coefficients for wavelengths between 360 and 953 nm for Terskol Peak (the Northern Caucasus). The values are derived from CCD photometric observations taken from August 1996 to August 2002 with the Two-Channel Focal Reducer of the Max-Planck Institute for Aeronomy which is attached to the 2-m RCC telescope at the observatory on Terskol Peak. The values obtained, together with ones published before, were used for the investigation of time variations of the aerosol component of atmospheric extinction. For the period under investigation (from 1973 to 2002), no systematic long-standing changes of atmospheric transparency are found. Season variations of aerosol extinction are revealed; the most value of the aerosol extinction is observed in spring. It is shown from the study of the wavelength dependence of the extinction coefficients that the aerosol scattering can be fitted by $\lambda^{-\alpha}$ where the parameter α equals 0.9, 1.2 and 2.2 for observations made in spring, in summer, and in autumn, respectively. The mean value $\alpha = 1.4$ is indicative of a good atmospheric transparency at the Terskol Peak Observatory.

ВСТУПЛЕНИЕ

На протяжении многих лет на высокогорной астрономической обсерватории, расположенной на пике Терскол (Северный Кавказ, $\lambda = 42.50083^\circ$, $\varphi = 43.27427^\circ$, $h = 3100$ м) проводятся фотометрические наблюдения с использованием различных инструментов и приборов. Так как фотометрическая методика в большинстве случаев требует оценки и учета атмосферной прозрачности, коэффициенты экстинкции для пика Терскол определялись неоднократно как для узких фотометрических полос [1, 4, 5], так и в стандартной системе *UBVR* [3, 6].

С 1996 года на пике Терскол ведутся фотометрические наблюдения с 2-канальным фокальным редуктором Института аэронамии общества имени М. Планка (Германия). Установленный на 2-м телескопе системы Ричи-Кретьена прибор имеет две регистрирующие ПЗС-матрицы и позволяет использовать интерференционные фильтры. Описание прибора и системы фильтров можно найти в работе [12]. Фотометрические программы, посвященные исследованию тел Солнечной системы, сопровождалось определением прозрачности атмосферы в широком диапазоне длин волн. Здесь мы приводим монохроматические коэффициенты атмосферной экстинкции, полученные в 1996—2002 гг., и результаты их сравнения со значениями, опубликованными в предыдущих работах.

ЗНАЧЕНИЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЭКСТИНКЦИИ

Для определения коэффициента экстинкции в спектральной полосе λ мы использовали дифференциальный метод, который заключается в измерениях двух стандартных звезд, которые расположены на разных зенитных расстояниях z [8]. Таким образом, в течение ночи можно надежно контролировать изменение прозрачности атмосферы, обрабатывая пары звезд. В конце каждого периода наблюдений среднее для данного периода значение коэффициента атмосферной экстинкции вычислялось из обработки всех

Таблица 1. Значения средних монохроматических коэффициентов экстинкции

Период наблюдений	λ , нм	K_λ	σ_{K_λ}	Наблюдатель
Август, 1996	426 ^m	0.299	0.023	Т. Креднер
	444	0.272	0.013	
Октябрь, 1996	367	0.339	0.007	
	406	0.419	0.269	
	426	0.313	0.011	
	444	0.282	0.012	
	501	0.189	0.028	
	510	0.180	0.052	
	614	0.062	0.025	
	642	0.095	0.035	
	662	0.030	0.010	
	667	0.080	0.019	
Март, 1997	672	0.111	0.010	
	360	0.480	0.003	
	368	0.460	0.004	
	426	0.335	0.006	
	444	0.245	0.043	
Октябрь-ноябрь, 1999	642	0.086	0.073	
	890	0.001	0.039	
Ноябрь, 2000	631	0.102	0.007	И. Кулик К. Йоккерс, И. Кулик
	672	0.066	0.006	
	890	0.052	0.010	
	953	0.062	0.018	
Январь, 2001	890	0.032	0.014	И. Кулик
	890	0.019	0.040	
Ноябрь-декабрь, 2001	443	0.256	0.098	Т. Бонев
	526	0.123	0.008	
	713	0.037	0.027	
	853	0.010	0.002	
Август, 2002	443	0.334	0.002	К. Йоккерс, И. Кулик
	526	0.15	0.01	
	642	0.067	0.002	

кадров, полученных в этот период. Для этого составлялась система линейных уравнений вида

$$m_\lambda(z) - m_\lambda(0) = \text{const}(\lambda) + K_\lambda M(z), \quad (1)$$

где $m_\lambda(z)$ — инструментальная звездная величина стандартной звезды, $m_\lambda(0)$ — ее заатмосферная звездная величина, взятая из каталогов спектрофотометрических стандартов [7, 9], $\text{const}(\lambda)$ — константа перехода от инструментальной звездной величины к каталожной, K_λ — монохроматический коэффициент экстинкции, $M(z)$ — воздушная масса, на которой наблюдалась звезда. Мы не имели достаточно данных, чтобы учесть пространственное изменение атмосферной экстинкции, хотя в работах [4, 5] указывается на то, что азимутальный эффект экстинкции может достигать 0.04—0.07^m, а в работе [3] остаточные отклонения стандартных звезд от бугеровских прямых описываются полусуточными вариациями физического состояния земной атмосферы, которые связаны с приливным воздействием Луны и Солнца.

Определенные методом наименьших квадратов коэффициенты экстинкции для разных периодов наблюдений и длин волн представлены в табл. 1. Здесь даются также средние квадратичные ошибки коэффициентов, которые вычислены по остаточным отклонениям индивидуальных звезд от теоретических бугеровских прямых. По средним для каждого периода значениям монохроматических коэффициентов экстинкции были вычислены коэффициенты прозрачности атмосферы над пиком Терскол для разных длин волн:

$$p_\lambda = \lg 10^{-0.4K_\lambda}. \quad (2)$$

ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПРОЗРАЧНОСТИ

Для оценки изменения прозрачности атмосферы со временем мы сопоставили результаты, приведенные в табл. 1, со средними коэффициентами экстинкции, определенными из фотоэлектрических наблюдений весеннего и летнего периодов 1973 г. [4, 5]. Таким образом, изучались три набора данных, которые относились к 1973, 1996 и 2000—2001 гг. Для аппроксимации наблюдений использовалась модель вертикальной атмосферной экстинкции, описанная в работе [11]. Эта модель включает три источника экстинкции, являющихся важными для наземной фотометрии: рэлеевское рассеяние молекулами, аэрозольное рассеяние и молекулярное поглощение. Формулы для вычисления рэлеевского компонента $A_R(\lambda, h)$ для высоты h над уровнем моря приводим в соответствии с данными [11]:

$$A_R(\lambda, h) = 9.4977 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\lambda^4} \left[\frac{(n-1)_\lambda}{(n-1)_{\lambda=1}} \right]^2 \exp\left(\frac{-h}{7.996}\right), \quad (3)$$

где

$$\frac{(n-1)_\lambda}{(n-1)_{\lambda=1}} = 0.23465 + \frac{107.6}{146 - \lambda^{-2}} + \frac{0.93161}{41 - \lambda^{-2}}. \quad (4)$$

Так как наблюдения проводились на длинах волн, свободных от линий и полос поглощения земной атмосферы, молекулярное поглощение не учитывалось. Третью составляющую экстинкции — рассеяние на аэрозолях (частицах пыли, воды, льда) — можно представить уравнением

$$A_a(\lambda, h) = \frac{A_0}{\lambda^\alpha} \exp(-h/H), \quad (5)$$

где $A_a(\lambda, h)$ выражен в звездных величинах на единицу воздушной массы, а длина волны λ выражена в микронах. Параметр A_0 характеризует среднюю величину аэрозольной экстинкции или степень замутнения атмосферы и зависит от расположения обсерватории. Коэффициент α зависит от соотношения между радиусом рассеивающих частиц и длиной волны. Для шкалы высот H распределения аэрозолей в атмосфере мы приняли значение 1.5 км (обсуждение и ссылки см. в работе [11]). Параметры аэрозольного ослабления излучения оценивались из аппроксимации спектральной зависимости экспериментально измеренных средних коэффициентов экстинкции (после вычитания рэлеевского компонента) из уравнения (5). Для оценки параметров A_0 и α использовался метод [10], который позволяет обнаружить такие значения параметров A_0 и α , которые обеспечивают минимум функции χ^2 :

$$\chi^2 = \sum \left\{ \frac{1}{\sigma_i^2} \left[K'_{\lambda_i} - \frac{A_0}{\lambda_i^{-\alpha}} \exp(-h/H) \right]^2 \right\}. \quad (6)$$

Величина K'_λ — средний коэффициент экстинкции, свободный от рэлеевской составляющей; величина σ^2 назначалась для каждого значения K'_λ в соответствии с данными табл. 1 или на основе оценок точности наблюдений [1, 4, 5]. Параметры, соответствующие минимуму функции χ^2 для рядов наблюдений разных лет, представлены в табл. 2.

На рис. 1 нанесены коэффициенты прозрачности атмосферы для периодов наблюдений 1973, 1996 и 2000—2002 гг., а также модельные кривые, описывающие зависимость коэффициента прозрачности от длины волны. Теоретически рассчитанные величины коэффициентов прозрачности включают в себя ослабление вызванное рэлеевским и аэрозольным рассеянием.

Таблица 2. Оценки параметров, характеризующих аэрозольное рассеяние в атмосфере над пиком Терскол

Период наблюдений	λ , нм	A_0	α	СКО
1973 г.	350.0—750.0	0.3	1.1	0.06 ^m
1996 г.	320.0—672.0	0.2	1.2	0.03
2000—2002 г.	526.0—953.0	0.2	1.4	0.02

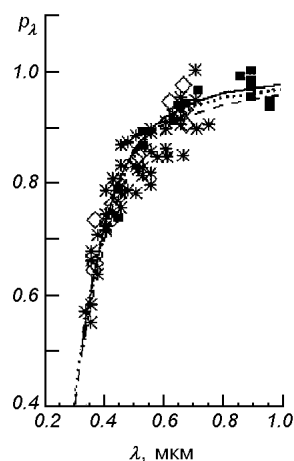


Рис. 1. Средние коэффициенты прозрачности атмосферы на пике Терскол и их теоретические аппроксимации: для 1973 г. — звездочки и штриховая линия, 1996 г. — ромбики и сплошная линия, 2000—2002 г. — квадратики и пунктир

Все три кривые, соответствующие разным временным периодам, согласуются между собой в пределах точности наблюдательных данных. Спектральные зависимости коэффициентов прозрачности описываются близкими значениями параметров α аэрозольной составляющей рассеяния. Средняя величина аэрозольной экстинкции A_0 практически не изменяется со временем. Таким образом, можно сказать, что в пределах точности, с которой проводились фотометрические измерения, не удалось обнаружить систематических изменений величины аэрозольного рассеяния в атмосфере на протяжении периода 1976—2002 гг. Большой разброс данных 1973 г., возможно, обусловлен сезонными вариациями состояния атмосферы, которые мы попытаемся оценить.

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ

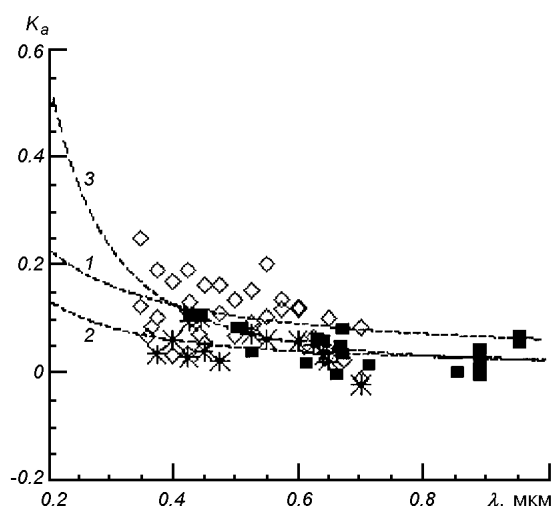
Для оценки сезонных вариаций изменения атмосферной прозрачности над пиком Терскол определялись параметры аэрозольной составляющей атмосферной экстинкции для каждого сезона отдельно, если было достаточно наблюдательных данных. При этом мы предполагали, что величина аэрозольной экстинкции существенно не изменялась в течение периода 1973—2002 гг., а также не принимали во внимание локальные отклонения атмосферного давления от стандартных условий, что приводит к ошибке вычисления рэлеевской составляющей рассеяния по формулам (3), (4).

Наиболее вероятные значения параметров A_0 и α для каждого сезона отдельно приведены в табл. 3. На рис. 2 представлены теоретические кривые, рассчитанные со значениями параметров, взятыми из таблицы, и наблюдательные данные, по которым проводилась аппроксимация. Значение параметра α изменяется от 0.9 до 2.2 в зависимости от сезона наблюдений. Значение α в среднем составляет 1.4, что соответствует условиям с хорошей атмосферной прозрачностью [2, 11]. Средняя величина аэрозольной экстин-

Таблица 3. Оценки параметров, описывающих аэрозольную составляющую экстинкции над пиком Терскол для разных сезонов

Сезон наблюдений	$\lambda\lambda$, нм	A_0	α	СКО
Весна	350.0—700.0	0.4	0.9	0.05 ^m
Лето	375.0—700.0	0.1	1.2	0.03
Осень	429.0—953.0	0.1	2.2	0.02

Рис. 2. Аэрозольная составляющая K_a атмосферной экстинкции для разных сезонов наблюдений и соответствующие теоретические кривые: ромбики и кривая 1 — весна, звездочки и кривая 2 — лето, квадратики и кривая 3 — осень



кции, или параметр A_0 , характеризующий мутность атмосферы, существенно выше для весеннего периода наблюдений чем для летнего или осеннего.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

В работе представлены значения средних коэффициентов экстинкции на пике Терскол с 1996 по 2002 гг. для спектрального интервала $\lambda\lambda = 360\text{...}953$ нм. Они могут быть использованы для учета атмосферного ослабления при редукции фотометрических наблюдений, а также для контроля изменения прозрачности над пиком Терскол со временем. Полученные значения средних коэффициентов экстинкции хорошо согласуются с ранее опубликованными. Исследование спектральной зависимости атмосферной экстинкции, измеренной в разные периоды в широком диапазоне длин волн, дает основание предположить отсутствие систематических изменений прозрачности с 1973 по 2002 гг.

Исследование сезонных изменений величины коэффициента экстинкции показывает, что аэрозольная составляющая в среднем следует закону $\propto \lambda^{-\alpha}$, а параметр α принимает значения 0.9, 1.2 и 2.2 для весеннего, летнего и осеннего сезонов наблюдений соответственно. Среднее значение $\alpha = 1.4$ характеризует пик Терскол как астропункт с хорошей атмосферной прозрачностью. Средняя величина аэрозольной экстинкции, характеризующая мутность атмосферы, существенно выше для весеннего периода наблюдений, чем для летнего или осеннего.

1. Аврамчук В. В., Семенов Т. П. Определение спектрального коэффициента прозрачности земной атмосферы на пике Терскол в октябре-ноябре 1973 г. // Астрометрия и астрофизика.—1975.—Вып. 26.—С. 113—116.
2. Аллен К. У. Астрофизические величины. — М.: Мир, 1977.—446 с.

3. 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 небесных тел.—1996.—12, № 4.—С. 60—73.
4. Депенчук Е. А., Комаров Н. С. Монохроматический коэффициент экстинкции по спектрофотометрическим наблюдениям на пике Терскол // Астрометрия и астрофизика.—1978.—Вып. 36.—С. 92—96.
5. Комаров Н. С., Депенчук Е. А., Чуприна Р. И. Астроклиматические характеристики пика Терскол. Монохроматический коэффициент экстинкции // Астрометрия и астрофизика.—1974.—Вып. 24.—С. 115—119.
6. Пугач А. Ф., Кондратьев 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.
7. *Спектрофотометрия* ярких звезд / Под ред. И. Н. Глушневой. — М.: Наука, 1982.—256 с.
8. Харди Х. Редукция фотоэлектрических наблюдений. Методы астрономии / Под ред. В. А. Хилтнера. — М.: Мир, 1967.—С. 157—183.
9. Bessel M. S. Spectrophotometry: Revised standards and techniques // Publ. Astron. Soc. Pacif.—1999.—111.—P. 1426—1433.
10. Bevington Ph. R. Data reduction and error analysis for the physical sciences. — New-York: McGraw-Hill Book Company, 1969.—331 p.
11. Hayes D. S., Latham D. W. A rediscussion of the atmospheric extinction and the absolute spectral-energy distribution of Vega // Astrophys. J.—1975.—197, N 3.—P. 593—601.
12. Jockers K., Credner T., Bonev T., et al. Exploration of the Solar System with the Two-Channel Focal Reducer at the 2-m RCC telescope of Pík Terskol Observatory // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. Ser.—2000.—N. 3.—P. 13—18.

Поступила в редакцию 28.01.04