

## ПОЛЯРИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН

УДК 551.521.3

В.К. Ошлаков, В.П. Галилейский, А.М. Морозов

**О распределении по небосводу степени поляризации суммарного излучения от двух источников***Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 28.06.2003 г.

Приведены некоторые результаты атмосферно-оптических наблюдений, проведенных с помощью панорамного фотометра. Представлены (в приближении однократного рассеяния) результаты расчета распределения степени поляризации излучения от двух внеатмосферных источников с использованием модели яркости атмосферы, наблюдаемой с поверхности планеты.

Поле нисходящего солнечного излучения содержит в себе информацию о всех актах взаимодействия, связанных с ослаблением излучения (рассеянием и поглощением) и изменением поляризации. Спектральная яркость и поляризация — две характеристики одного и того же процесса взаимодействия излучения с атмосферой. Изменение одной из них влечет изменение другой, но характер изменения зависит от свойств частиц, участвующих в атмосферно-оптических процессах взаимодействия. Основной вклад в процессы ослабления излучения и изменения поляризации вносят результаты взаимодействия с молекулами атмосферных газов и с атмосферным аэрозолем.

Для чистой, приближенной по свойствам к молекулярной, оптически устойчивой атмосферы можно дать описание распределения яркости и поляризации [1, 3], с указанием пространственного положения максимумов и минимумов, объясняемых с точки зрения молекулярного рассеяния. Максимумы яркости — в направлении на Солнце и в пригоризонтной зоне. Минимум — в солнечном вертикале, на расстоянии порядка  $90^\circ$  от Солнца, в этой же зоне расположен максимум в распределении степени поляризации, обусловленный, в основном, молекулярным рассеянием (рис. 1). При наличии аэрозолей картина распределения искажается в зависимости от оптической активности, от концентрации и распределения по размерам и других параметров ансамблей аэрозольных частиц [8].

Внутри- и внеатмосферные источники оптического излучения могут вносить искажения в «фоновые» распределения яркости и поляризации в зависимости от их относительной (по сравнению с Солнцем) интенсивности и взаимного пространственного расположения источников излучения и наблюдателя. К классу дополнительных (к основному) внутри- и внеатмосферных источников излучения можно отнести источники как природного, так и искусственного происхождения. По характеристикам излучения это могут быть источники диффузного или направленного действия. Это могут быть источники как первичного излучения (Солнце, звезды, источники на орбитальных платформах,

молнии, болиды, вулканы, пожары, взрывы; бортовые и наземные прожектора, лазеры и т.д.), так и источники вторичного, например рассеянного, излучения. Такими источниками могут быть облака, в том числе и аэрозольные, рассеивающие и отражающие фоновое излучение [11], скопления несферических атмосферных частиц, связанные с инверсионными слоями [13], Луна и т.п.

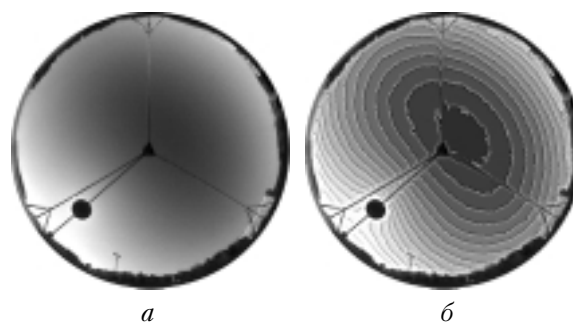


Рис. 1. Угловое распределение яркости дневного безоблачного неба для  $\lambda = 0,45$  мкм при зенитном угле Солнца  $60^\circ$ : *a* — результаты наблюдений; *б* — результат предварительной обработки (скелетизация изображения)

Кроме того, в последнее время к искусственным внутриатмосферным источникам излучения следует отнести и суперконтинуум — светящийся канал, возникающий вдоль трассы распространения фемтосекундного лазерного импульса [15].

Дополнительные источники излучения могут быть пространственно-распределенными или точечными, находящимися в поле зрения наблюдателя или вне его, действующими продолжительное время либо мгновенными. На рис. 1, *a* приведено изображение безоблачного небосвода, полученное в канале общего обзора панорамного фотометра [14] (см. рис. 3, *a*); на рис. 1, *б* — изофоты, обработка изображения рис. 1, *a*; на рис. 2, *a* — результаты расчетов в приближении однократного рассеяния по модели [10]; положения Солнца на рис. 1 и 2 совпадают.

На рис. 3, *a* представлено схематичное изображение оптико-механической части панорамной

фотометрической установки, разработанной в ИОА СО РАН для проведения фотометрических наблюдений пространственно-временной изменчивости поля яркости дневного и сумеречного неба: соосно со сферическим зеркалом расположена телекамера,

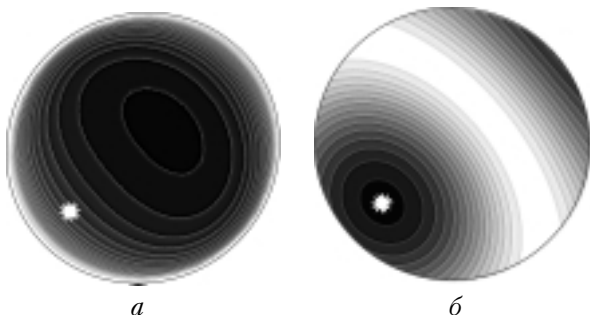


Рис. 2. Распределение яркости (а) и степени поляризации (б) дневного неба, вычисленные для однократного молекулярного рассеяния и тех же условий, что и на рис. 1

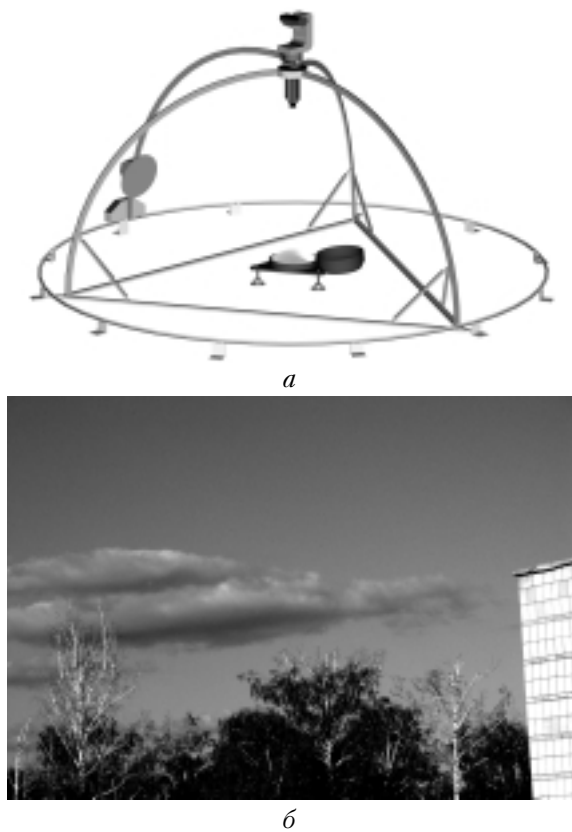


Рис. 3. Схема оптико-механической части панорамного фотометра [14] (а) и изображение, полученное в канале локального обзора; в кадре присутствуют участок неба с облачными элементами, изображения верхушек деревьев и стены здания, облицованной серой (силикатной) плиткой (б)

система формирует изображение небесной полушеры с частью подстилающей поверхности; черный диск экранирует зеркало от прямого излучения Солнца. В верхней части установки расположена камера локального обзора; обе телекамеры связаны с компьютером наблюдателя через специально разработанный блок сопряжения видеоизображений.

Видеосигналы обрабатываются как по стандартным, так и по специально разработанным программам цифровой обработки видеоизображений. Изображение участка небосвода (рис. 3,б) с характерным облачным элементом, верхушками деревьев и стеной здания получено с помощью камеры локального обзора. Тип облачности — *Cu hum*. Взаимное расположение Солнца и наблюдателя обеспечивает регистрацию в диапазоне углов рассеяния, включающем максимум поляризации молекулярного рассеяния и значения углов радуг при рассеянии каплями воды [8].

На рис. 4 приведены изображения с линиями изофот и изополяр по результатам обработки исходного изображения рис. 3,б.

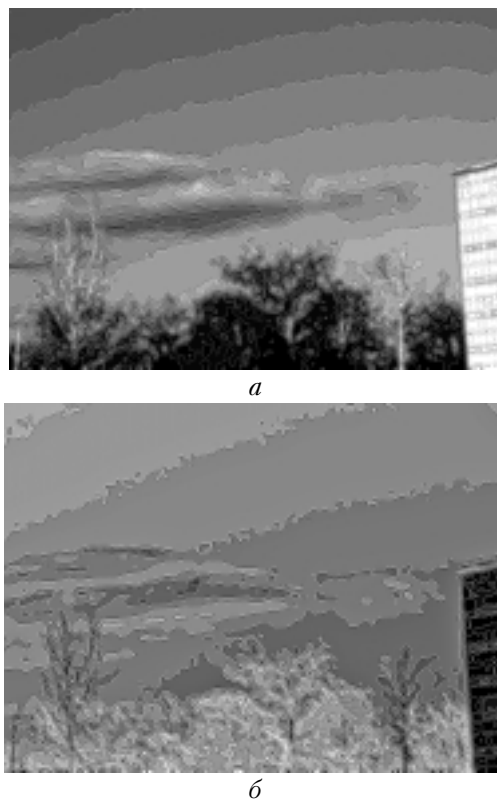


Рис. 4. Результаты компьютерной обработки изображения (см. рис. 3,б): изофоты (а) и изополяры (б)

Общая картина распределения яркости и степени поляризации нисходящего поля солнечного излучения искажается в зоне нахождения облака за счет многократного рассеяния на облачных частицах. В изображениях деревьев и стены здания также можно выделить общие закономерности — зонам максимальной яркости соответствуют зоны минимальной степени поляризации.

На рис. 5 дано изображение небосвода, характеризующее распределение яркости при сплошной облачности — *Ac trans.*, 10 баллов. В распределении яркости по небосводу при наличии сплошной облачности характерны отмеченные ранее закономерности. Искажения в фоновом распределении яркости особенно заметны при сравнении с распределением яркости, приведенным на рис. 1,б и 2,а.

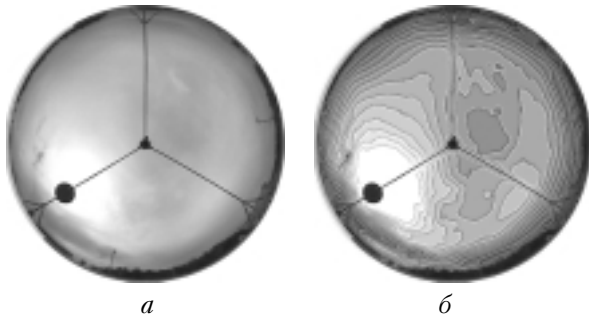


Рис. 5. Изображение небосвода при сплошной облачности (а) и обработка изображения (б), изофоты

При компьютерной обработке изображений, полученных с помощью панорамной фотометрической установки, авторы статьи использовали достаточно сложный обнаружитель, в котором алгоритмы принятия решения о наличии вторичного источника излучения в анализируемой части изображения построены на анализе распределений отсчетов яркости в трех спектральных зонах [12]. В условиях близости оптических свойств земной и «молекулярной» атмосферы (фоновое распределение) и при наличии изолированных (одиночных) излучающих объектов оказалась возможной идентификация источника вторичного излучения (в качестве обучающих выборок использовались распределения яркости в молекулярной атмосфере). Производилось сравнение полученных выборок с обучающими (аналогичными приведенным на рис. 1, 2), затем вычислялась оценка вероятности наличия вторичного источника путем вычисления отношения числа отсчетов (в данном случае — двумерных распределений яркости), отличных от «фоновых», к общему числу отсчетов.

В данной статье рассматривается следующая задача. Одной из основных характеристик рассеянного излучения является поляризация, возникающая, как известно, и в результате рассеяния неполяризованного излучения. Необходимо, во-первых, сделать описание совместного распределения степени поляризации излучения от двух источников, во-вторых, определить по результатам наблюдения параметры неизвестного источника — его интенсивность и степень поляризации, в-третьих, произвести классификацию сигналов в серии панорамных поляризационных изображений небосвода методом сравнения с «фоновыми» распределениями (обучающими выборками).

С точки зрения наземного наблюдателя задачи обнаружения действия второго источника и определение его характеристик сводятся к задачам обнаружения полезных сигналов на фоне помех, классификации сигналов и принятия решений в условиях неопределенности. При решении подобных задач выводы необходимо делать на основе анализа накопленных выборок смеси входных сигналов, содержащих представителей всех классов. При построении алгоритма принятия решения о наличии дополнительного источника можно учесть свойства распределений смеси сигналов и использовать

известные критерии оптимальности и решающие правила [5, 7, 9, 14]. При описании смеси входных сигналов, т.е. пространственно-временного распределения степени поляризации солнечного излучения, можно использовать информацию о фоновом распределении степени поляризации солнечного излучения по небосводу из непосредственных наблюдений или из таблиц, например, [6], или из результатов моделирования.

Примем схему расчета, аналогичную приведенной в [2], но с условием облучения рассеивающего объема излучением от двух источников: возбуждающие пучки естественного (неполяризованного) света распространяются в направлении оси  $x$ . Рассеивающий объем поместим в начало координат. Излучения от двух независимых источников рассеиваются в плоскости  $xOy$  в сторону наблюдателя под углами  $\alpha$  («фон») и  $\beta = \alpha \pm \Delta$  («сигнал») соответственно, где  $\Delta$  — разность между значениями углов направлений на источники. Плоскость рассеяния, как обычно, содержит возбуждающие и рассеянные пучки.

Модель расчета степени поляризации излучения от двух источников рассмотрена в [16]. Будем считать, что контролируемый внутриагмосферный объем облучается неполяризованным монохроматическим излучением от двух внеатмосферных источников. Один из источников формирует поле излучения с интенсивностью  $I_{\phi}(t)$ . Если параметр  $t$  — время, то рассматриваемая последовательность — временной ряд результатов наблюдения. В последовательности отсчетов излучение первого источника представлено классом отсчетов «фон». Второй источник с интенсивностью  $I_c(t)$  («сигнал») формирует добавочное к фоновому поле излучения, наблюдаемое одновременно с фоновым. Добавочное поле излучения в последовательности отсчетов представлено классом «сигнал». Наблюдаются результаты однократного рэлеевского рассеяния (т.е. размеры атмосферных частиц малы по сравнению с длиной волны излучения, частицы изотропны в смысле поляризуемости) [1–3, 8]. Исходя из этих условий, осуществим моделирование распределения степени поляризации.

Уточним условия задачи. В наблюдаемой последовательности отсчетов к излучению постоянно действующего источника класса «фон» с некоторой вероятностью примешивается излучение источника класса «сигнал». Процессы  $I_{\phi}(t)$ ,  $I_c(t)$  — статистически независимы. Среднее (по параметру  $t$ ) значение последовательности наблюдаемых в течение конечного времени результатов рассеяния можно представить в виде [4, 16]:

$$I_n = I_{\phi} + mI_c, \quad (1)$$

где  $I_n$ ,  $I_c$ ,  $I_{\phi}$  — средние значения интенсивностей: наблюдаемой и рассеянной под углами  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $I_c$  и  $I_{\phi} \neq 0$ ,  $m = 0, \dots, 1$  — эмпирическая вероятность наблюдения второго источника в данной реализации.

Следует отметить, что эмпирическая вероятность  $m$  в данной модели имеет смысл «вклада» второго источника в наблюдаемую (в среднем)

последовательность отсчетов: чем ближе к фоновому среднее значение наблюдаемой интенсивности, тем ниже вероятность обнаружения вклада излучения от второго источника.

Учитывая, что полная интенсивность  $I_n$  для любого направления при рэлеевском рассеянии света представлена соотношением между перпендикулярными (индекс I) и параллельными (индекс II) плоскости рассеяния составляющими, и применяя правило (1) к алгебраической сумме ортогональных составляющих, получим выражения для интенсивности смеси сигналов молекулярного рассеяния от двух независимых источников:

$$I_n = I_{In} + I_{II n} = (I_{I\phi} + I_{II\phi}) + m(I_{Ic} + I_{IIc}), \quad (2)$$

и для степени поляризации  $P_n$ :

$$P_n = \frac{I_{In} - I_{II n}}{I_{In} + I_{II n}} = \frac{I_{0\phi} \sin^2 \alpha + m I_{0c} \sin^2 \beta}{I_{0\phi} (1 + \cos^2 \alpha) + m I_{0c} (1 + \cos^2 \beta)}. \quad (3)$$

В (3) показана зависимость наблюдаемой величины степени поляризации не только от угла рассеяния, но и от интенсивностей облучающих объем рассеяния излучений  $I_{0\phi}$  и  $I_{0c}$  и, кроме того, от вероятности облучения контролируемого объема вторым источником на фоне постоянно действующего первого источника. Значение наблюдаемой поляризации при  $m = 0$  сводится к известному «классическому» представлению и равно поляризации в классе «фон», а при  $m = 1$  (постоянно действующий источник класса «сигнал») — к значению поляризации в классе «сигнал+фон», отличному от фонового значения.

Используя (3), можно выразить, например, угол рассеяния  $\beta$  через другие величины — вероятность наблюдения суммарного излучения, исходные значения интенсивностей, составляющих наблюдаемое суммарное излучение, степень поляризации фонового и суммарного излучений, угол рассеяния фонового излучения, считая их известными априори или по результатам наблюдений.

На рис. 6 представлены зависимости расчетной степени поляризации (рэлеевское рассеяние) от угла рассеяния, полученные по формуле (3): для одного источника ( $m = 0$ ) — кривая 1; двух источников — кривая 2 (угол  $\beta = \alpha + \pi/3$ ) и кривая 3 ( $\beta = \alpha - \pi/3$ ), где  $\pi/3$  — разность между углами облучения (от источников), кривые 2, 3 получены для значения вероятности  $m = 0,8$ . Значения степени поляризации рассчитаны в предположении совпадения плоскостей рассеяния обоих источников.

На практике степень поляризации и значение угла поляризации выражают через значения вектор-параметра Стокса [8]. Для обсуждаемого представления наблюдаемое значение степени линейной поляризации  $P_n$  и угла поляризации  $\gamma_n$  может быть выражено в виде [16]:

$$P_n = \frac{\sqrt{m^2(S_{2c}^2 + S_{3c}^2) + 2m(S_{2c}S_{2\phi} + S_{3c}S_{3\phi}) + S_{2\phi}^2 + S_{3\phi}^2}}{mS_{1c} + S_{1\phi}} \quad (4)$$

и

$$\operatorname{tg} 2\gamma_n = \frac{mS_{3c} + S_{3\phi}}{mS_{2c} + S_{2\phi}}, \quad (5)$$

где  $S_{ic}$ ,  $S_{i\phi}$  — значения вектор-параметра Стокса,  $i = 1, 2, 3$ .

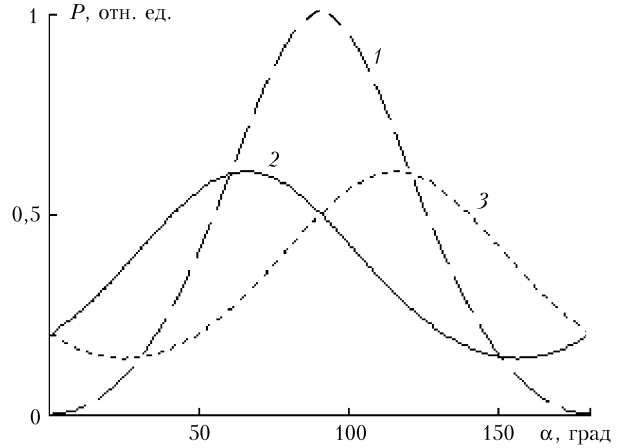


Рис. 6. Степень поляризации рассеянного излучения

Для описания изменчивости пространственного фонового распределения степени поляризации под влиянием излучения от неизвестного источника воспользуемся моделью формирования яркости рассеянного солнечного излучения в земной атмосфере с точки зрения топоцентрического (наземного) наблюдателя [10]. Модель создана в предположении сферичности и постоянной однородности оптических свойств атмосферы при одновременном действии нескольких механизмов формирования яркости (молекулярное и аэрозольное рассеяние, молекулярное поглощение). Кроме того, в модели предусмотрен учет оптико-физических характеристик средств наблюдения, которые используются при наблюдении яркости атмосферы (апертура, фокус, спектральная чувствительность и др.). Вычислительная реализация модели поля яркости дневного неба позволяет для заданных высотных профилей молекулярного и аэрозольного рассеяния и молекулярного поглощения рассчитывать яркость рассеянного солнечного излучения в выбранной спектральной области. Внеатмосферный поток солнечной радиации задается на интервале 200–2495 нм с максимальным разрешением в видимой области 0,1 нм. Результаты моделирования поля яркости атмосферы с помощью указанной модели и данные выполненных фотометрических наблюдений подтвердили их хорошее совпадение.

Пример реализации расчетов степени поляризации для рэлеевского (однократного) рассеяния представлен на рис. 7. Здесь приведены результаты расчета распределения степени поляризации по небосводу в модели [10, 16] с учетом (1) – (3), при условии облучения атмосферы одним и двумя внеатмосферными монохроматическими источниками с длиной волны  $\lambda = 0,69$  мкм. В случае двух источников предполагается совпадение их зенитных углов (совпадение альмукуантаратов) и равенство интенсивностей. Результаты адаптированы под ре-

зультаты панорамных наблюдений [14] (см. рис. 1, 2, 5). На рис. 7 нанесены линии равных значений степени поляризации — изополяры.

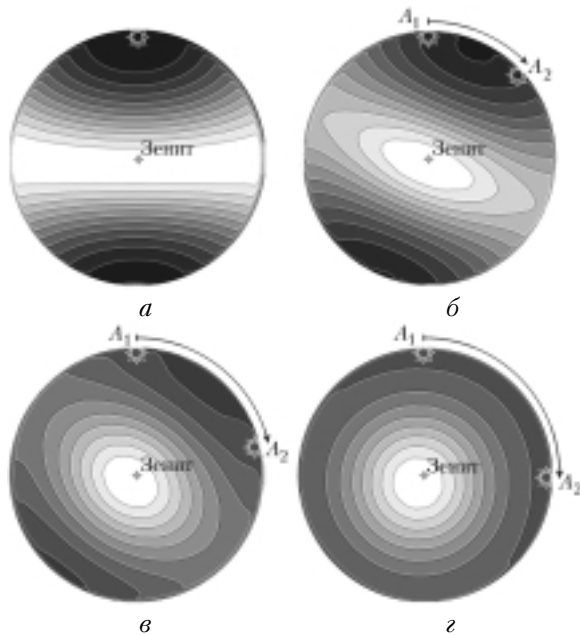


Рис. 7. Результаты расчета распределения степени поляризации по небосводу по модели [10], рэлеевское (однократное) рассеяние: *a* — «классическая» картина распределения степени поляризации по небосводу при облучении Солнцем, зенитный угол  $90^\circ$ ; максимум степени поляризации наблюдается на угловых удалениях  $90^\circ$  от источника; *b*, *v* и *z* — результаты расчета распределения степени поляризации при одновременном облучении атмосферы двумя внеатмосферными источниками равной интенсивности с совпадающими альмукантаратами, но с разными азимутами [10, 16]

Из анализа картины распределения степени поляризации (рис. 7) следует, что при облучении одним источником зона максимальной степени поляризации расположена перпендикулярно азимуту источника, что совпадает с известным представлением о распределении степени поляризации по небосводу. При облучении атмосферы двумя источниками меняется общая картина распределения степени поляризации и, в частности, определение направления на тот или другой источник по ориентации зон максимальной и минимальной степени поляризации неоднозначно.

Следующим шагом будет учет влияния внутриатмосферного источника на фоновые распределения яркости и поляризации. На этапе вычисления распределений яркости, степени поляризации и угла поляризации выявились вполне очевидные проблемы, связанные с необходимостью учета влияния аэрозоля и эффектов многократного рассеяния на исходные распределения. Для повышения достовер-

ности результатов необходимо учитывать влияние аэрозольного рассеяния, что является самостоятельной и сложной задачей.

Материалом для данной статьи явились результаты работы, выполняемой при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-05-65169).

1. Пясковская-Фесенкова Е.В. Исследование рассеяния света в земной атмосфере. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 220 с.
2. Шишловский А.А. Прикладная физическая оптика. М.: Физматгиз, 1961. 824 с.
3. Лившиц Г.Ш. Рассеянный свет дневного неба. Алма-Ата: Наука, 1973. 145 с.
4. Френкс Л. Теория сигналов: Пер. с англ. / Под ред. Д.Е. Вакмана. М.: Сов. радио, 1974. 344 с.
5. Миленский А.В. Классификация сигналов в условиях неопределенности (Статистические методы самообучения в распознавании образов). М.: Сов. радио, 1975. 328 с.
6. Яркость и поляризация безоблачной атмосферы. Алма-Ата: Наука, 1979. 201 с.
7. Быков Р.Е., Гуревич С.Б. Анализ и обработка цветных и объемных изображений. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
8. Лиоу К.-Н. Основы радиационных процессов в атмосфере. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 376 с.
9. Шалыгин А.С., Палагин Ю.И. Прикладные методы статистического моделирования. Л.: Машиностроение, 1986. 320 с.
10. Галилейский В.П., Морозов А.М. Яркость атмосферы, наблюдаемая с поверхности планеты. Деп. ВИНТИ, № 1172-1387, 1987. 10 с.
11. Белан Б.Д., Задде Г.О., Ковалевский В.К., Панченко М.В., Рассказчикова Т.М., Тертугова С.А., Толмачев Г.Н., Тумаков А.Г. О природе аэрозольных неконденсационных облаков // Оптика атмосф. 1988. Т. 1. № 6. С. 67–77.
12. Ошлаков В.К. Определение наличие облачности на линии визирования по результатам фотометрирования // Оптика атмосф. и океана. 1990. Т. 3. № 4. С. 431–435.
13. Галилейский В.П., Гришин А.И., Морозов А.М., Ошлаков В.К. Зеркальное отражение от атмосферных несферических частиц // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 9. С. 1301–1305.
14. Галилейский В.П., Морозов А.М., Ошлаков В.К. Панорамный фотометрический комплекс для контроля прямой и рассеянной солнечной радиации // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во «Спектр» Института оптики атмосферы СО РАН, 1997. 295 с.
15. Woste L., Wedekind C., Wille H., Rairoux P., Stein B., Nikolov S., Werner Ch., Niedermeier S., Schillinger H., Sauerbrey R. Femtosecond Atmospheric Lamp // Laser und Optoelektronik. 1997. V. 29. P. 51–53.
16. Ошлаков В.К. Модель составного сигнала в интерпретации поляризационных атмосферно-оптических наблюдений // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 2. С. 131–133.

*V.K. Oshlakov, V.P. Galileiskii, A.M. Morozov. Distribution of the degree of polarization of net radiation from two sources over the sky.*

Some results of atmospheric optical observations conducted with a panoramic photometer are presented. The distribution of the degree of polarization of radiation from two extraterrestrial sources is calculated in the single-scattering approximation using the model of atmospheric brightness as observed from the planet's surface.