

# **МНОГОЦВЕТНАЯ ПОЛЯРИМЕТРИЯ СУМЕРЕЧНОГО НЕБА. РОЛЬ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА КАК ФУНКЦИЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ.**

*О.С. Угольников<sup>1</sup>, И.А. Маслов<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Астрокосмический центр Физического института РАН, Москва*

*<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва*

Поступила в редакцию 28.11.2000 г.

Работа посвящена исследованию роли многократно рассеянного света в светлые сумерки в различных длинах волн, а также влиянию многократного рассеяния и рассеяния на частицах атмосферного аэрозоля в этот период на поляризацию фона сумеречного неба. Основой работы являются широкоугольные поляриметрические наблюдения сумеречного неба вблизи зенита с ПЗС-камерой в полосах U, B, V и R, проведенные летом 2000 г. в Южной лаборатории ГАИШ.

На основе полученных данных определена доля однократно рассеянного света в светлые сумерки в зените для полос U, B и V, а для полосы R получена оценка этой величины снизу. Проведен анализ цветовых и поляризационных изменений фона неба в период сумерек с учетом свойств однократного и многократного рассеяния. Получена также характерная высота верхней границы приземного аэрозольного слоя в атмосфере Земли.

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

Работа посвящена одной из самых важных проблем при сумеречном зондировании атмосферы Земли – проблеме учета многократного рассеяния света. Настоящая работа является продолжением [1], распространяя предложенный там метод на широкий диапазон длин волн, охватывающий весь видимый участок спектра. Это позволяет получить зависимость соотношения однократного и многократного рассеяния от длины волны и тем самым проследить его связь с цветовыми изменениями сумеречного неба, происходящими с ростом или уменьшением глубины Солнца под горизонтом.

Проблема многократного рассеяния и его зависимости от длины волны обсуждается уже очень давно, начиная с работы В.Г. Фесенкова [2]. Особое внимание этой проблеме уделил Г.В. Розенберг в своей монографии [3]. Во многих работах часто указывалось на эффективность поляриметрических наблюдений для решения проблемы многократного

рассеяния [4], так как эта компонента сумеречного неба имеет поляризационные свойства, сильно отличающиеся от однократно рассеянной компоненты. Степень поляризации многократного рассеяния значительно меньше, чем у однократного (а вдали от зенита даже имеет место эффект “обратной поляризации”). Кроме этого, с заходом Солнца под горизонт источники света для двух компонент (Солнце и заревой сегмент) удаляются на небе друг от друга, что также сказывается на поляризации сумеречного неба, и именно этот эффект послужил основой для метода, предложенного в [1] и развиваемого в настоящей работе.

Однако при разделении однократного и многократного рассеяния поляризационным методом возникает проблема, связанная с рассеянием солнечного света на частицах атмосферного аэрозоля. Из-за пониженной (по сравнению с релеевским рассеянием) поляризации и неизвестными заранее зависимостями от угла рассеяния и длины волны эту компоненту можно спутать с многократным рассеянием. С подобной ситуацией мы сталкиваемся в [3], где была сделана попытка объяснить рассеянием на аэрозоле поляризационные и цветовые эффекты в темные сумерки, когда многократное рассеяние становится доминирующим на всех длинах волн (что, впрочем, в [3] отрицается).

В работе [1] роль многократного рассеяния была оценена для длины волны 3560 А, в которой, как выяснилось, аэрозольное рассеяние при восходе (заходе) Солнца не играет заметной роли (по крайней мере в большинстве дней наблюдений), что вполне ожидаемо для ясного дня в фиолетовой области спектра. Однако, с ростом длины волны роль аэрозольного рассеяния должна возрастать сразу по двум причинам. Во-первых, спектральная зависимость коэффициента аэрозольного рассеяния гораздо слабее, чем для воздуха ( $\lambda^{-4}$ ), и во-вторых, однократное рассеяние в длинноволновой части спектра происходит на меньших высотах в атмосфере, где существенно возрастает концентрация приземного аэрозоля. Таким образом, в настоящей работе перед нами ставилась задача определить, при каких длинах волн можно применять метод в том же виде, что и в [1], а в каком случае в этом методе необходим учет аэрозольного рассеяния.

## 2. МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ ОДНОКРАТНОГО И МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ.

Рассмотрим вкратце основные поляризационные свойства однократно и многократно рассеянной компонент сумеречного неба (более подробно они описаны в [1]). Вместо степени поляризации мы будем пользоваться поляризационным отношением  $K$ , равным отношению яркостей в плоскостях поляризации, параллельной и перпендикулярной плоскости рассеяния. Эта величина равна нулю для линейно поляризованного излучения и единице – для неполяризованного. Степень поляризации  $p$  связана с  $K$  соотношением  $p=(1-K)/(1+K)$ .

Рассматривая лишь точки, находящиеся на солнечном вертикале, будем считать их зенитное расстояние  $z$  положительным в области зари и отрицательным – в противоположной области неба. Однократное рассеяние формируется в основном релеевским (газовым) рассеянием, поляризационное отношение  $Q$  которого зависит от угла рассеяния  $\gamma$ :

$$Q = \frac{\cos^2 \gamma + \alpha}{1 + \alpha} \quad (1),$$

где параметр  $\alpha$  для атмосферного воздуха равен 0.03 [1]. Тем самым, в направлении, перпендикулярном падающему излучению (эта ситуация имеет место в зените при восходе и заходе Солнца), рассеянный свет практически линейно поляризован, а плоскость поляризации перпендикулярна плоскости рассеяния. Для солнечного вертикала  $\gamma = \pi/2 - z + h$ , где  $h$  – истинная, без учета рефракции, глубина погружения Солнца под горизонт ( $h < 0$ , если Солнце находится над горизонтом). При изменении  $h$  точка наибольшей поляризации (наименьшего  $Q$ ) движется по солнечному вертикалу, оставаясь всегда в  $90^\circ$  от Солнца. Явлением атмосферной рефракции мы пренебрегаем, так как рассеяние света формируется на значительных высотах [1, 5].

Если к газовому рассеянию примешивается аэрозольное, поляризация однократно рассеянной компоненты становится слабее, и величина  $Q$  увеличивается. Можно ожидать, что в первом приближении формула (1) останется справедливой, но параметр  $\alpha$  примет уже другое, причем неизвестное значение. Однако и в этом случае точка с наименьшим  $Q$  будет сохранять постоянное угловое расстояние на небе от Солнца.

Многokrратно рассеянная компонента будет сильно ослаблять поляризацию фона неба, и ее поляризационное отношение  $q$  значительно выше. Поскольку вторичным источником излучения является все небо, и, прежде всего, его заревой сегмент, точка наименьшего  $q$  уже не будет двигаться за Солнцем, оставаясь в зените.

Опишем кратко метод разделения однократного и многократного рассеяния, предложенный в [1]. Введем величину  $A$ , равную отношению яркости однократно рассеянной компоненты к полной яркости неба при плоскости поляризации, перпендикулярной плоскости рассеяния. Тогда поляризационное отношение фона сумеречного неба будет равно

$$K = AQ + (1 - A)q \quad (2).$$

Далее, продифференцировав формулу (2) по  $z$  и  $h$  и исключив слагаемые, обращающиеся в нуль, получаем:

$$\frac{d^2 K}{dzdh} = A \frac{d^2 Q}{dzdh} + (Q - q) \frac{d^2 A}{dzdh} \quad (3).$$

В случае незначительности роли однократного аэрозольного рассеяния из последней формулы путем преобразований, описанных в [1], можно получить формулу для величины  $A$ :

$$A = -\frac{d^2 K}{dzdh} \left( \frac{2}{1 + \alpha} + \left( K - \frac{\alpha}{1 + \alpha} \right) \left( \frac{H_{L0}}{H_{atm}} - 1 \right) \right)^{-1} \quad (4),$$

где  $H_{L0}$  – средняя высота рассеяния,  $H_{atm}$  – высота однородной атмосферы. Необходимо обратить внимание, что второе слагаемое в формуле (3) и в скобках формулы (4) существенно меньше первого. Зная величины  $A$ ,  $Q$  и  $K$ , можно определить также  $q$  и полную долю однократного рассеяния в яркости неба  $A_T$ .

Появление аэрозольной компоненты существенно усложняет картину. Прежде всего, параметр  $\alpha$  становится неизвестным, и из уравнения (4) уже нельзя однозначно получить величину  $A$ . Кроме этого, наличие аэрозоля, высотное распределение которого неизвестно, может существенно изменить величины  $H_{L0}$  и  $H_{atm}$ , и их, вообще говоря, нельзя будет вычислять, исходя из простой газовой модели атмосферы.

### 3. НАБЛЮДЕНИЯ

Поляриметрические наблюдения сумеречного неба были проведены в июле-августе 2000 года в Южной лаборатории ГАИШ (п. Научный, Крым, Украина). Фон сумеречного неба в окрестности зенита регистрировался при помощи ПЗС-камеры ST-6, имеющей формат матрицы 375x241 пиксель. В качестве объектива использовалась короткофокусная линза с диафрагмой ~4 мм. Максимальный диаметр поля зрения составлял около 29°. Наблюдения проводились в цветовых полосах U, B, V и R (с эффективными длинами волн около 3600, 4400, 5500 и 7000 Å соответственно), причем в августе 2000 г. было сделано несколько синхронных наблюдений в полосах V и R, используя два комплекта аппаратуры. Эффективная длина волны полосы U очень близка к длине волны, на которой проводились аналогичные наблюдения на Астрономической обсерватории Одесского университета в 1997 г. [1], тем самым появилась возможность наглядного сравнения результатов.

Фон сумеречного неба фиксировался при трех положениях поляроида, отстоящих друг от друга на  $120^\circ$ . Лабораторные исследования поляроида “Soligor” показали, что его степень поляризации превышает 99.9% в полосах V и R, а в полосах U и B она составляет соответственно 89.5% и 97.3%, что учитывалось при обработке данных. Камера ориентировалась приблизительно в зенит, а ее точная ориентация определялась по положению звезд на изображениях ночного неба. Величина экспозиции варьировалась в диапазоне от 0.01 с в светлые сумерки до 256 с ночью.

Большое поле зрения позволяло измерять поляризационное отношение сумеречного неба не только в зените, но и на некотором удалении от него, что дало возможность с достаточной точностью находить производные величины, необходимые для метода разделения однократного и многократного рассеяния.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В начале обзора результатов наблюдений отметим практическую неизменность поляризационного отношения фона сумеречного неба при смещении точки наблюдения перпендикулярно солнечному вертикалу вблизи зенита. Это свойство одинаково хорошо выполняется для всех длин волн, что вполне естественно, так как при этом не изменяется ни угол однократного рассеяния, ни условия формирования многократно рассеянной компоненты. Поэтому для обработки использовались только точки солнечного вертикала и зависимость поляризационного отношения  $K$  от величин  $z$ ,  $h$  и  $\lambda$ .

На рис.1 показаны зависимости поляризационного отношения фона сумеречного неба в зените  $K$  от глубины погружения Солнца под горизонт  $h$  для различных дат наблюдений в разных цветовых полосах. Для сравнения также приведена аналогичная зависимость для одного из наблюдений 1997 года. Видно, что кривая, соответствующая полосе U, достаточно близка к данным [1] для близкой длины волны. Ход кривой для других длин волн имеет тот же вид, хотя само поляризационное отношение изменяется с длиной волны. Вблизи  $h=0$  (восхода или захода Солнца) поляризационное отношение изменяется достаточно медленно, а при  $h>4^\circ$  оно начинает быстро расти, что, как было показано в [1] и в чем мы сможем убедиться и в данной работе, связано с уменьшением роли однократно рассеянного света в этот период. Необходимо отметить, что в это же время быстро начинает изменяться и цвет неба, как было показано во многих работах, в том числе [5]: его медленное покраснение сменяется быстрым посинением. Г.В. Розенберг [3] пытался объяснить этот эффект в рамках исключительно однократного рассеяния, однако, как мы покажем далее, природа цветовых изменений сумеречного неба выходит за эти рамки.

При уменьшении величины  $h$  в область отрицательных величин (поднятии Солнца над горизонтом) мы вновь сталкиваемся с увеличением  $K$ , хотя и более медленным. Этот эффект имеет две причины: удаление точки максимальной поляризации однократно рассеянного света от зенита и, на первый взгляд, парадоксальное небольшое увеличение роли многократного рассеяния с появлением Солнца над горизонтом, отмеченное в [1].

С ростом длины волны от полосы U к полосе V поляризационное отношение уменьшается, то есть поляризация сумеречного неба усиливается, несмотря на то, что при росте длины волны логично ожидать деполяризующее влияние атмосферного аэрозоля. Это указывает на увеличение роли сильно поляризованного однократного рассеяния на фоне многократного при больших длинах волн, что также было предположено в [1].

Поляризационное отношение сумеречного неба в полосе R весьма близко к величине  $K$  в полосе V, причем эти величины изменяются практически синхронно, что хорошо видно на рис.1. Однако, как мы убедимся далее, роль многократного рассеяния при переходе к полосе R продолжает убывать, но поляризация не усиливается из-за роста вклада аэрозольного рассеяния.

Как мы уже отмечали выше, точка максимальной поляризации (минимального  $Q$ ) для однократного рассеяния движется по солнечному вертикалу вслед за Солнцем, в то время как аналогичная точка для многократного рассеяния практически неподвижна. На рис.2 показана зависимость зенитного расстояния точки с наименьшим значением общего поляризационного отношения  $K$  от глубины погружения Солнца под горизонт для одного из синхронных наблюдений в полосах V и R. Видно, что при заходе Солнца эта точка смещается за ним, что указывает на существенную роль однократного рассеяния, однако после погружения Солнца на глубину  $6^\circ$  она возвращается к зениту, что говорит о доминировании многократного рассеяния в этот период сумерек.

До сих пор мы проводили лишь качественный анализ роли многократного рассеяния и его связи с поляризацией сумеречного неба. Для количественных оценок необходимо подробнее рассмотреть зависимость поляризационного отношения фона неба от глубины погружения Солнца не только в зените, но и на удалении от него. На рис.3 показаны зависимости  $K$  от  $h$  для одной из дат наблюдений при  $z=\pm 10^\circ$ . Видно, что в момент восхода (захода) Солнца поляризация в этих точках изменяется в противоположных направлениях, так как точка максимальной поляризации приближается к одной из этих точек и удаляется от другой. Этот эффект, присущий исключительно однократно рассеянной компоненте, был отмечен в [1] и послужил основой метода разделения однократной и многократной компонент, описанного выше.

Однако мы еще не установили границы применимости этого метода в его “классическом” виде, область длин волн, при которых однократное рассеяние на атмосферном аэрозоле можно считать несущественным. Это предположение может выполняться для фиолетовых лучей и заведомо не должно выполняться для красных. Для нахождения этой границы построим диаграмму соотношения двух величин, которые определяются из наблюдений и входят в основную в методе формулу (4): поляризационное отношение  $K$  и его смешанная производная по  $z$  и  $h$ . На рис.4 нанесены точки для наблюдений 2000 года, в которых указанные параметры были определены с хорошей точностью, а также точки, соответствующие наблюдениям 1997 года в длине волны, близкой к полосе U. На этой диаграмме крестом помечена точка, соответствующая идеализированной ситуации: отсутствия многократного рассеяния и атмосферного аэрозоля (в этом случае величина  $K$ , совпадающая с  $Q$ , и ее смешанная производная не зависят от длины волны).

На диаграмме видно, что большинство точек, соответствующих наблюдениям в фиолетовой области спектра как в 1997, так и в 2000 году, а также большинство точек, соответствующих наблюдениям 2000 года в полосах В и V, приближаются к одной прямой, проходящей также рядом с “идеальной” точкой, соответствующей чистому однократному релеевскому рассеянию. В это же время точки наблюдений в полосе R находятся в другой части диаграммы, и лишь одна из них (вечер 4.VIII.2000 г.) находится ближе к данной прямой, причем в этот день прозрачность атмосферы была очень хорошей, а поляризация фона сумеречного неба – самой сильной за время наблюдений в полосах V и R. Из этого можно сделать вывод, что именно в полосе R становится заметным влияние однократного аэрозольного рассеяния, в то время как в полосах U, В и V в большую часть наблюдений оно остается несущественным. Исключение составляют лишь утро 30.VII. 1997 г. на длине волны 3560 А и утро 30.VII. 2000 г. в полосе В. Очень небольшая примесь аэрозольного рассеяния также могла иметь место утром 28.VII. 2000 г. (полоса В) и утром 5-7.VIII. 2000 г. (полоса V). Точки, соответствующие данным наблюдениям, отклоняются на рис.4 от прямой в том же направлении, что и точки наблюдений в полосе R. Любопытно отметить, что следы однократного аэрозольного рассеяния в полосе V и на более коротких длинах волн наблюдались только в утренние сумерки.

В подтверждение сказанному выше нужно добавить, что линейная связь между величиной  $K$  и ее смешанной производной при отсутствии аэрозольного рассеяния вполне естественно вытекает из формул (2) и (4) с учетом постоянства  $\alpha$ , малости второго слагаемого в скобках формулы (4) и слабой зависимости величины  $(Q-q)$  от длины волны, что тоже должно иметь место в случае релеевского рассеяния.

Из всего сказанного не нужно делать вывод, что атмосферный аэрозоль вообще никак не проявляет себя в ясную погоду в видимой части спектра, кроме красных лучей. Мы можем говорить лишь о малости коэффициента аэрозольного рассеяния по сравнению с релеевским в большинстве дней наблюдений только при углах рассеяния около  $90^\circ$  для данных длин волн и высот, на которых происходит рассеяние во время восхода и захода Солнца (эти высоты составляют для полос U, B и V около 15-25 км). Вполне естественно, что для полосы R, в которой рассеяние происходит ближе к поверхности Земли, влияние аэрозольного рассеяния существенно возрастает. Таким образом, наш вывод не противоречит результатам измерения функций рассеяния приземного воздуха на основе измерений яркости дневного неба, где влияние атмосферного аэрозоля было ощутимым [6].

Однако данного вывода вполне достаточно, чтобы мы могли определить баланс яркостей однократно и многократно рассеянного света в зените в светлые сумерки для цветовых полос U, B и V методом, предлагаемым в [1] и рассматриваемым в данной работе, пользуясь формулой (4). В этой формуле величина  $K$  и ее смешанная производная берутся из наблюдений, а величины  $H_{L0}$  и  $H_{atm}$  могут быть вычислены из газовой модели атмосферы с учетом высоты точки наблюдения над уровнем моря. При этом мы можем принять то же высотное температурное распределение, что использовалось в [1], так как наблюдения 1997 и 2000 гг. проводились на близких географических широтах в один и тот же сезон года. С учетом практического постоянства температуры воздуха на высотах от 10 до 30 км (в среднем 220К) величина  $H_{atm}$  оказывается равной 6.43 км для всех цветовых полос. Величина  $H_{L0}$  составляет 24.0 км для полосы U, 18.9 км для полосы B и 13.4 км для полосы V, причем в последнем случае при расчете учитывалось селективное поглощение атмосферного озона в полосах Шапюи, попадающих на зелено-желтую часть спектра.

В таблице для всех дат наблюдений 1997 и 2000 годов, где указанные параметры были определены с хорошей точностью, приводятся значения поляризационного отношения фона сумеречного неба  $K$  в зените в момент  $h=0$ , смешанной производной этой величины по  $z$  и  $h$ , доли однократно рассеянного света в яркости неба в плоскости поляризации, перпендикулярной ( $A$ ) и параллельной ( $a$ ) плоскости рассеяния и доли однократного рассеяния во всей яркости неба ( $A_T$ ) в зените в момент  $h=0$ . В последнем столбце таблицы приведена относительная ошибка  $E$  определения смешанной производной  $K$ , практически совпадающая с относительными ошибками определения величин  $A$ ,  $a$  и  $A_T$ . Звездочка (\*) около значений  $A$ ,  $a$  и  $A_T$  означает, что в данные сумерки была вероятна примесь аэрозольного рассеяния, и данные значения могут быть неточными (вероятнее всего, несколько заниженными).

Из таблицы видно, что однократно рассеянный свет составляет менее половины от общей яркости неба в фиолетовой области спектра, однако с ростом длины волны его роль постепенно возрастает, и в полосе V в момент восхода или захода Солнца яркость однократно рассеянного света иногда достигает 70% от общей яркости неба в зените. Этот результат приближается ко многим теоретическим оценкам соотношения однократного и многократного рассеяния [3], отчасти снимая противоречие, обнаруженное в [1]. Из этого же следует вывод, что многократно рассеянный свет является более “синим”, чем однократно рассеянный, что вполне естественно, учитывая большой коэффициент поглощения и рассеяния воздуха в синей области спектра.

Роль однократного рассеяния изменяется день ото дня, заслуживает внимания ее уменьшение вечером 30.VII и 31.VII.2000 г. Одним из возможных объяснений этого явления может послужить так называемый “барьерный эффект”, рассматривавшийся Г.В. Розенбергом [3] и проявивший себя в [5] как существенное уменьшение яркости сумеречного неба в длинноволновой части спектра в некоторые дни, не связанное с изменением прозрачности атмосферы в пункте наблюдения. Схема этого эффекта показана на рис.5. Если в направлении зашедшего Солнца появляются преграды для распространения света (облака), это может существенно понизить яркость однократно рассеянного света, меньше сказываясь на многократно рассеянной компоненте. В пользу этой схемы говорит и появление облаков над зашедшим Солнцем, наблюдавшееся в оба указанных выше вечера.

Еще одной причиной изменений баланса однократного и многократного рассеяния может быть приземный атмосферный аэрозоль, не освещаемый прямыми лучами Солнца и не создающий однократного рассеяния, однако влияющий на яркость многократно рассеянной компоненты и проявляющий себя также поглощением света.

В полосе R ситуация, как уже говорилось, складывается намного более сложным образом. Существенное влияние аэрозольного рассеяния для большей части наблюдений сказывается в виде сдвига точек вниз и вправо на рис.4 – резкого увеличения модуля смешанной производной величины  $K$ , в то время как сама эта величина в полосе R практически не отличается от полосы V. Формальная подстановка найденных параметров в формулу (4) в некоторых случаях приводит к значению  $A$ , большему единицы, чего, разумеется, не может быть (этому соответствуют прочерки в таблице).

В качестве возможных объяснений столь резкого роста смешанной производной может быть существенное отличие поляризационной функции аэрозольного рассеяния от вида (1) с произвольным  $\alpha$  (на это также указывает значительное удаление точки максимальной поляризации от зенита при  $h=0$  в полосе R на рис.2), а также резкое убывание коэффициента

аэрозольного рассеяния с высотой, что приводит к уменьшению величины  $H_{\text{atm}}$ , увеличению модуля второго слагаемого в формулах (3) и (4) и, как следствие, увеличению модуля смешанной производной  $K$ . Учитывая, что однократное рассеяние света в полосе R происходит на высотах около 10 км, последнее предположение вполне согласуется с незначительностью аэрозольного рассеяния на высоте 15 км и более в полосах V, B и U.

Указанные причины не позволяют в общем случае применять формулу (4) для расчета баланса однократного и многократного рассеяния в полосе R. Однако, на основе данных вечера 4.VIII.2000 г., когда было зарегистрировано уменьшение модуля смешанной производной  $K$  и усиление поляризации (что указывало на ослабление аэрозольного рассеяния) можно с учетом  $H_{L0} = 9.8$  км получить характерную оценку величины  $A_T$  снизу, которая также приведена в таблице. Видно, что даже эта величина превышает типичное значение  $K$  для полосы V, что указывает на еще большее доминирование однократного рассеяния в красной области спектра в светлые сумерки. Однако, нужно заметить, что и в полосе R при больших погружениях Солнца однократное рассеяние теряется на фоне многократного, на что указывает возврат точки максимальной поляризации к зениту (рис.2).

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основным результатом настоящей работы стала оценка баланса однократно и многократно рассеянного света в зените в светлые сумерки для различных длин волн в видимой области спектра, а также оценка влияния атмосферного аэрозоля. В трех цветовых полосах (U, B и V) влияние однократного аэрозольного рассеяния в зените в светлые сумерки оказалось несущественным, кроме ряда сумерек, причем исключительно утренних. В полосе R, для которой однократное рассеяние происходит на меньших высотах, а релеевский коэффициент рассеяния значительно убывает, влияние аэрозольного рассеяния становится ощутимым. При этом поляризация фона неба остается такой же сильной, как и в полосе V, что говорит о значительной поляризации аэрозольного рассеяния, сравнимой с поляризацией всего фона неба. Данные, полученные в полосе R, указывают на быстрое убывание коэффициента аэрозольного рассеяния с высотой в тропосфере, вполне согласующееся с его практическим исчезновением на высоте 15 км, где происходит однократное рассеяние в полосе V в светлые сумерки.

Как было установлено в [1] и подтверждено сейчас, в фиолетовой части спектра роль однократного рассеяния в зените в момент восхода и захода Солнца составляет всего около 40% от общей яркости неба, что вступало в противоречие с теоретическими моделями,

описанными в [3]. С ростом длины волны роль однократного рассеяния увеличивается, составляя около 60% в полосе В и достигая иногда 70% в полосе V. Сильное влияние атмосферного аэрозоля не дает возможности точной оценки роли однократного рассеяния в светлые сумерки в полосе R, однако есть основания считать, что она составляет не менее 80%.

Большинство теоретических работ относились к желто-зеленому участку спектра, близкому к полосе V, и для момента восхода и захода Солнца давали значение  $A_T$  около 80%, что достаточно близко к результатам наших наблюдений, хотя и немного превосходит их. Однако с ростом глубины погружения Солнца эта разность существенно увеличивается. Результаты наблюдений как 1997, так и 2000 года ясно показывают, что при  $h > 8^\circ$  однократно рассеянный свет практически теряется на фоне многократного рассеяния во всех длинах волн, в то же время теоретические работы [3] это категорически отрицают. Причина этого противоречия обсуждалась в [1] и состоит в том, что в этих работах многократное рассеяние фактически сводилось к двукратному, и не учитывалось рассеяние третьего и более порядков, играющее определяющую роль при больших погружениях Солнца под горизонт.

Возможно эта же причина, а также большое количество упрощений легли в основу ошибочной оценки зависимости роли однократного рассеяния от длины волны. В работе [7] она оказывается очень слабой и даже немонотонной, а Г.В. Розенберг даже приходит к выводу об уменьшении роли однократного рассеяния в длинноволновой части спектра, называя многократно рассеянный свет более “красным”, чем однократно рассеянный [3], хотя тут же сталкивается с явно противоречащим этому эффектом, описывая “Пояс Венеры” – красное свечение над областью земной тени в противосолнечном вертикале.

Отличительные свойства многократно рассеянной компоненты (ослабленная поляризация с  $q \sim 0.5$  в светлые сумерки и избыток в коротковолновой части спектра) легко объясняют связь поляризационных и цветовых изменений сумеречного неба, происходящих с ростом погружения Солнца под горизонт, с ролью многократного рассеяния, в то время как попытка объяснить их в рамках исключительно однократного рассеяния наталкивается на неминуемые трудности.

Многочисленные цветовые измерения неба, описываемые в [3] и сделанные в [5], в сочетании с поляризационными измерениями в [1] и данной работе обнаруживают, что цвет и поляризация сумеречного неба в зените изменяются практически синхронно, причем покраснение неба сопровождается усилением его поляризации и наоборот. Это явно указывает на возможность единой причины цветовых и поляризационных изменений – изменения баланса однократного и многократного рассеяния.

В светлые сумерки, начинающиеся еще до захода Солнца и продолжающиеся до его погружения под горизонт на глубину около  $4^\circ$ , наблюдения [5] показали медленное покраснение неба, а в настоящей работе мы убедились, что поляризация фона неба в зените немного усиливается (а величина  $K$ , соответственно, уменьшается). В это время роль однократного рассеяния не убывает, а даже немного возрастает с погружением Солнца под горизонт. Кроме этого, на цвет неба в этот период также влияет селективное поглощение желто-зеленых лучей атмосферным озоном в полосах Шапюи и возможное уменьшение яркости неба в длинноволновой части спектра за счет “барьерного эффекта”. Оба этих фактора были отмечены в [5], однако из-за недооценки вклада многократного рассеяния их влияние было в данной работе завышено.

Когда глубина погружения Солнца под горизонт становится большей  $4-5$  градусов, ситуация кардинально изменяется – небо начинает синеть, а его поляризация быстро ослабляется. Нет сомнений, что эти эффекты связаны с быстрым убыванием роли однократного рассеяния на фоне многократного, которое было отмечено в [1] и связано с ускоряющимся ростом эффективной высоты однократного рассеяния. Однако поляризация многократного рассеяния в это время постепенно усиливается, так как заревой сегмент при этих погружениях Солнца становится более отчетливым, а рассеиваемое тропосферой излучение – более направленным. В результате, при погружениях Солнца около  $8^\circ-10^\circ$ , когда вклад однократного рассеяния становится очень малым, ослабление поляризации (рост  $K$ ) останавливается, и далее может начаться даже ее усиление [1, 3].

Резкая переоценка вклада однократного рассеяния в [3] заставила Г.В. Розенберга связать минимум поляризации при  $h=10^\circ$  с существованием устойчивого аэрозольного слоя на высотах  $80-100$  км (в мезосфере), однако подобное предположение в сочетании с синим цветом неба в это время иногда приводило к поистине фантастическим оптическим свойствам этих аэрозольных частиц: их коэффициент рассеяния убывал с длиной волны быстрее закона  $\lambda^{-4}$ , характерного для релеевского рассеяния [8]! Вполне логично, что в том же самом журнале была опубликована работа [9], в которой отмечалось, что поляризационные свойства сумеречного неба при данных погружениях Солнца под горизонт определяются в первую очередь многократным рассеянием, хотя для больших длин волн все же допускалось влияние мезосферного аэрозоля.

Все дальнейшие изменения цвета и поляризации фона неба, происходящие в глубокие сумерки при  $h>10^\circ$ , в частности, его покраснение, отмеченное в [3], могут быть связаны только с многократным рассеянием и проступающим на его фоне ночным небом, что приводит к резкому ослаблению поляризации в преддверии перехода сумерек в ночь.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью настоящей работы было развитие метода разделения однократно и многократно рассеянной компонент сумеречного неба в зените в светлые сумерки, предложенного в [1], на широкий интервал длин волн и его применение к данным многоцветных поляриметрических наблюдений сумеречного неба. Метод с хорошей точностью определяет роль однократного рассеяния в общей яркости неба в случае, если рассеяние прямых солнечных лучей на частицах атмосферного аэрозоля является несущественным. Такая ситуация имела место для дней наблюдения и указанного периода сумерек, соответствующего определенной высоте однократного рассеяния, для трех цветовых полос, в которых проводились наблюдения: U, В и V. Исключение составляют лишь несколько утренних наблюдений. Данные, полученные в четвертой полосе R, отчетливо указывают на существенную роль аэрозольного рассеяния, и поэтому нам удалось найти лишь нижний предел роли однократного рассеяния для данной области спектра.

Полученные результаты указывают на рост роли однократного рассеяния в длинноволновой части спектра. Это свойство, а также пониженная поляризация многократно рассеянного света, хорошо объясняют все изменения цвета и поляризации фона неба вблизи зенита в светлую фазу сумерек. Полученные значения роли однократного рассеяния в некоторых длинах волн оказываются близкими к теоретическим данным, но лишь для малых погружений Солнца, при переходе к более темной фазе сумерек роль однократного рассеяния оказывается намного ниже теоретических значений. Причины этого несогласия также обозначены в данной работе.

Увеличение роли однократного рассеяния с ростом длины волны делают желто-зеленую область спектра (полосу V) самой эффективной для сумеречного зондирования атмосферы, так как при дальнейшем увеличении длины волны весьма трудным становится учет тропосферного аэрозоля, который начинает играть заметную роль в однократном рассеянии и поглощении света в полосе R.

Работа выполнена в рамках проекта “Широкоугольная поляриметрия”, поддержанного Российским Фондом Фундаментальных Исследований, грант № 00-02-16396. Авторы выражают благодарность С.Б. Юдину, В.И. Шенаврину, П.А. Прудковскому и П.Д. Журавлеву за помощь в проведении наблюдений и лабораторных исследованиях поляроидов.

Работа посвящена памяти Г.Б. Шоломицкого, автора идеи проведения поляризационных исследований земной атмосферы в период сумерек с использованием ПЗС-камеры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Угольников О.С.* Фотометрия и поляриметрия сумеречного неба. Проблема многократного рассеяния света в период сумерек // *Космические исследования*. 1999. Т. 37. N2. С. 168.
2. *Фесенков В.Г.* О строении атмосферы (фотометрический анализ сумерек) // *Труды Главной российской астрофизической обсерватории*. 1923. Т. 2. С. 7.
3. *Розенберг Г.В.* Сумерки. М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры. 1963.
4. *Фесенков В.Г.* О поляризационном методе исследования сумеречных явлений // *Астрон. журн.* 1966. Т. 43. С. 198.
5. *Угольников О.С.* Определение параметров рассеяния света в земной атмосфере по фотометрическим наблюдениям сумеречного неба // *Космические исследования*. 1998. Т. 36. N5. С. 458.
6. *Пясковская-Фесенкова Е.В.* Исследование рассеяния света в земной атмосфере. М.: Изд-во АН СССР. 1957.
7. *Дивари Н.Б., Плотникова Л.И.* Вычисление яркости сумеречного неба // *Астрон. журн.* 1965. Т. 42. С. 1090.
8. *Дивари Н.Б.* Синий аэрозоль мезосферы и нижней термосферы // *Атмосферная оптика*. 1974. С. 223
9. *Загинайло Ю.И.* Определение рассеивающей способности атмосферы по поляризационным наблюдениям сумеречного неба // *Атмосферная оптика*. 1974. С. 149.

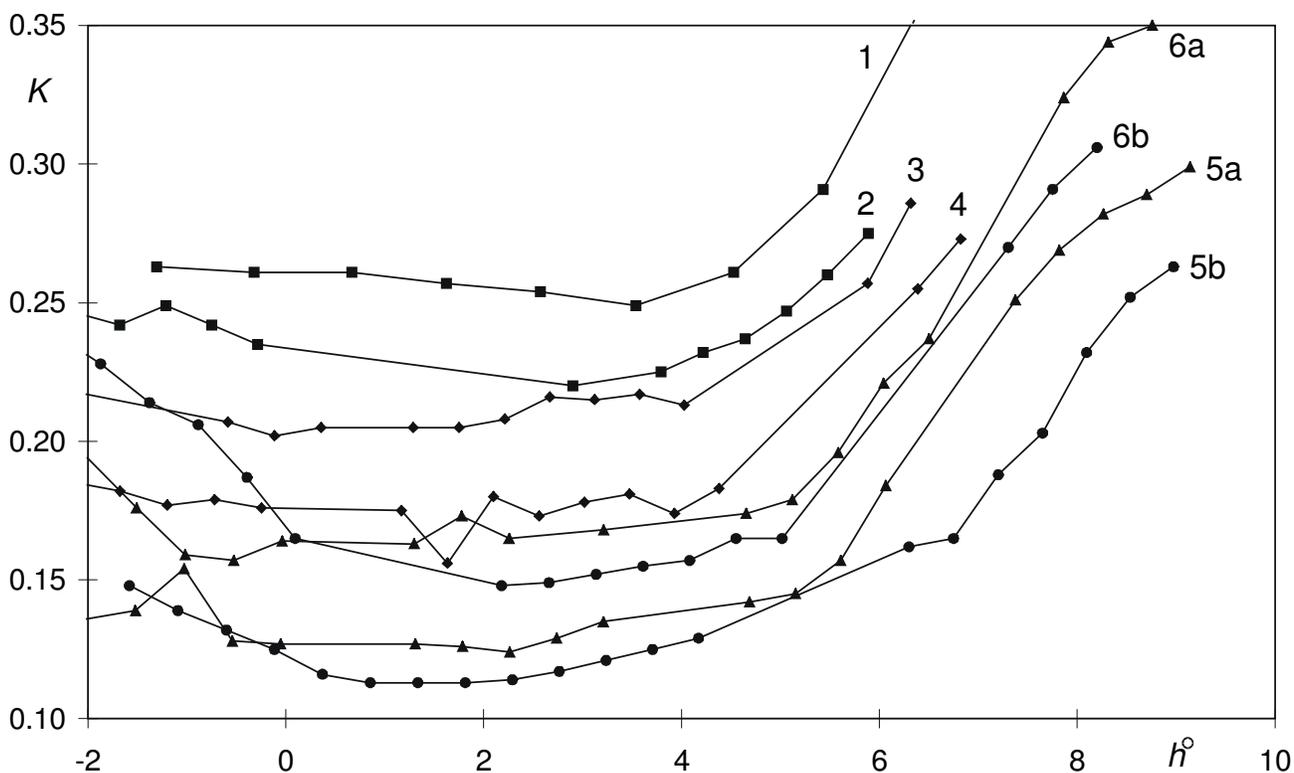


Рисунок 1. Зависимость поляризационного отношения  $K$  сумеречного неба в зените от глубины погружения Солнца под горизонт  $h$  для различных дат наблюдений и длин волн (1 – вечер 31.VII.1997, 3560 А, 2 – вечер 17.VII.2000, полоса U, 3 – утро 26.VII.2000, полоса В, 4 – утро 28.VII.2000, полоса В, 5а – вечер 4.VIII.2000, полоса V, 5b – вечер 4.VIII.2000, полоса R, 6а – вечер 6.VIII.2000, полоса V, 6b – вечер 6.VIII.2000, полоса R).

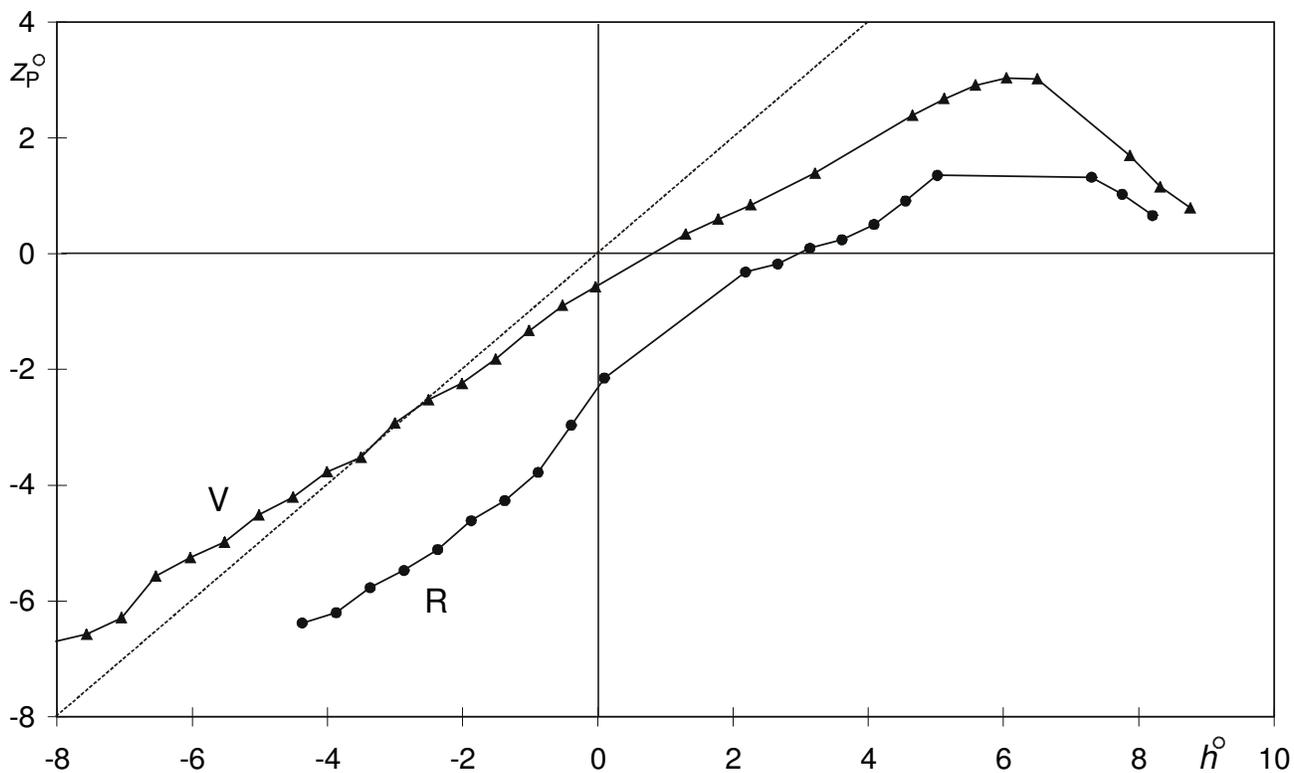


Рисунок 2. Зависимость зенитного расстояния точки с максимальной поляризацией  $z_p$  от глубины погружения Солнца под горизонт  $h$  в вечерние сумерки 6.VIII.2000 в полосах V и R. Пунктирная линия соответствует случаю однократного молекулярного рассеяния.

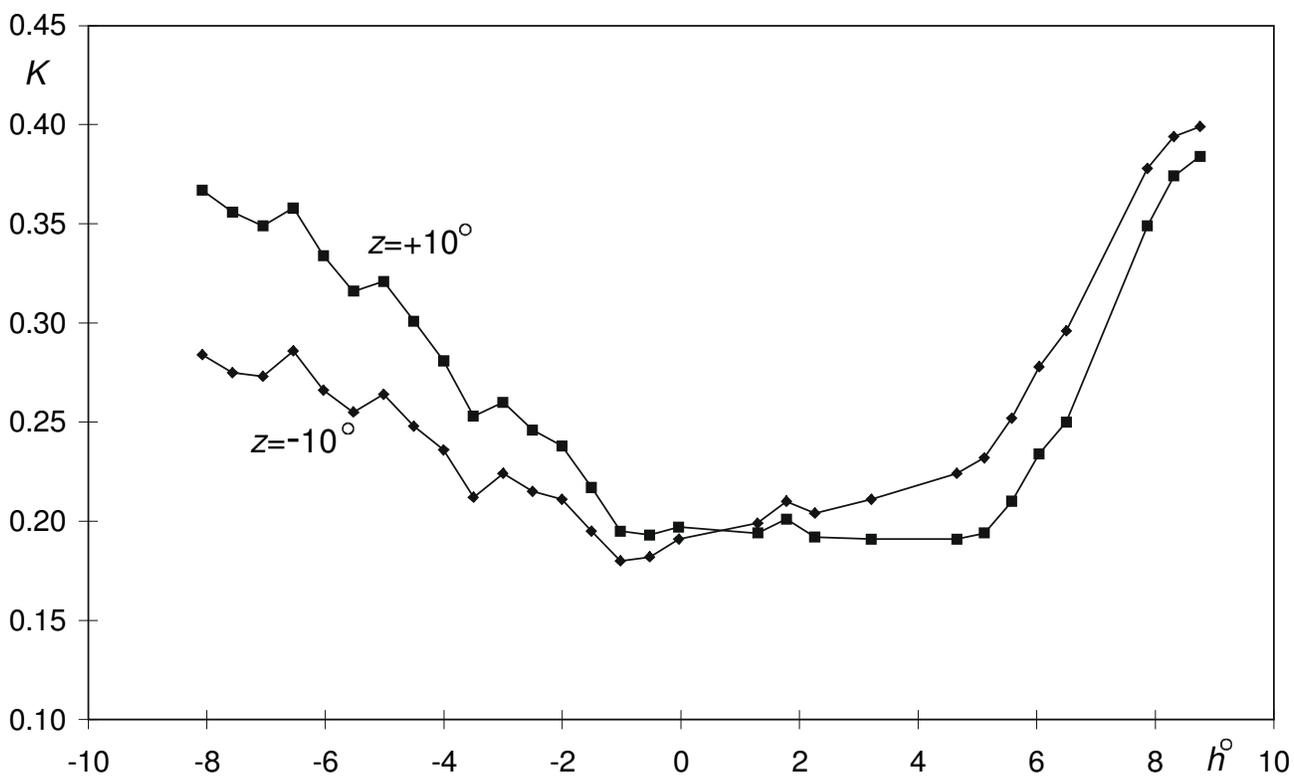


Рисунок 3. Зависимость поляризационного отношения  $K$  сумеречного неба в точках  $z=\pm 10^\circ$  от глубины погружения Солнца под горизонт  $h$  в вечерние сумерки 6.VIII.2000, полоса V.

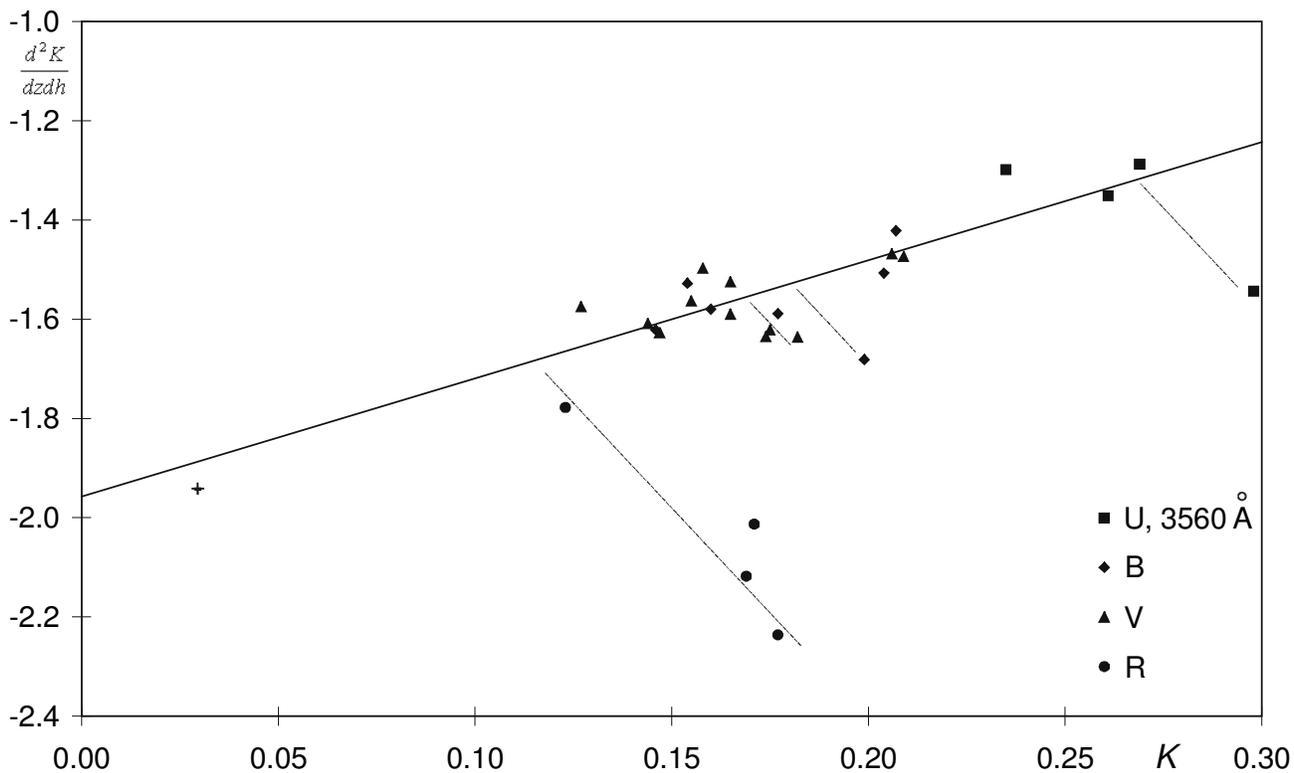


Рисунок 4. Соотношение поляризационного отношения  $K$  сумеречного неба и его смешанной производной по  $z$  и  $h$  в зените в момент  $h=0$  для наблюдений 1997 и 2000 годов.

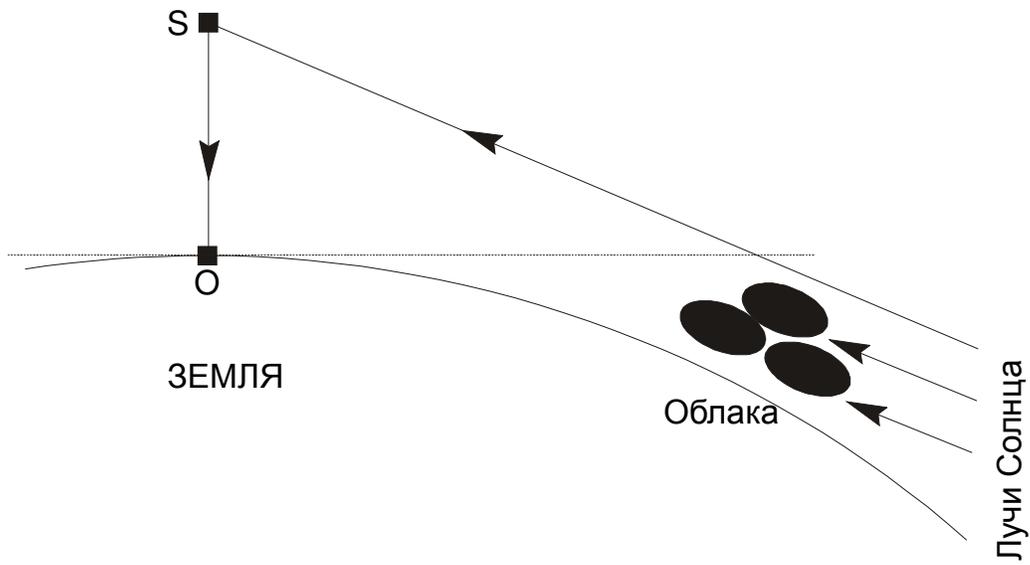


Рисунок 5. «Барьерный эффект», уменьшающий яркость однократно рассеянного света (O – точка наблюдения, S – точка рассеяния света).

Цветовая полоса	Дата	$K$	$\frac{d^2K}{dzdh}$	$A$	$a$	$A_0$	$E$
3560 А	<b>1997 г.</b>						
	30.VII, утро	0.298	-1.544	0.572*	0.056*	0.441*	0.005
	31.VII, вечер	0.261	-1.351	0.521	0.058	0.413	0.005
	1.VIII, утро	0.269	-1.288	0.492	0.053	0.388	0.010
	<b>2000 г.</b>						
U	17.VII, вечер	0.235	-1.298	0.518	0.064	0.432	0.013
B	25.VII, вечер	0.207	-1.422	0.622	0.088	0.530	0.023
	26.VII, утро	0.204	-1.507	0.661	0.094	0.565	0.037
	28.VII, утро	0.177	-1.589	0.713*	0.118*	0.624*	0.011
	28.VII, вечер	0.154	-1.528	0.700	0.132	0.624	0.007
	29.VII, утро	0.146	-1.622	0.748	0.149	0.672	0.011
	29.VII, вечер	0.160	-1.580	0.720	0.131	0.639	0.013
	30.VII, утро	0.199	-1.682	0.740*	0.108*	0.635*	0.031
V	30.VII, вечер	0.206	-1.468	0.688	0.097	0.587	0.022
	31.VII, вечер	0.209	-1.474	0.690	0.096	0.587	0.016
	3.VIII, вечер	0.155	-1.563	0.752	0.141	0.670	0.019
	4.VIII, утро	0.147	-1.627	0.786	0.156	0.705	0.020
	4.VIII, вечер	0.127	-1.575	0.769	0.177	0.702	0.013
	5.VIII, утро	0.174	-1.635	0.779*	0.130*	0.682*	0.032
	5.VIII, вечер	0.144	-1.609	0.779	0.157	0.700	0.025
	6.VIII, утро	0.182	-1.636	0.776*	0.124*	0.676*	0.031
	6.VIII, вечер	0.165	-1.525	0.730	0.129	0.645	0.019
	7.VIII, утро	0.175	-1.622	0.772*	0.128*	0.676*	0.021
7.VIII, вечер	0.158	-1.498	0.720	0.133	0.639	0.023	
R	8.VIII, утро	0.165	-1.590	0.761	0.135	0.673	0.025
	4.VIII, вечер	0.123	-1.778	0.893*	0.211*	0.818*	0.049
	6.VIII, вечер	0.169	-2.118	-	-	-	0.033
	7.VIII, вечер	0.177	-2.236	-	-	-	0.033
	8.VIII, вечер	0.171	-2.013	-	-	-	0.012

Таблица 1. (объяснение в тексте статьи)

**MULTI-COLOR POLARIMETRY OF THE TWILIGHT SKY.  
THE ROLE OF MULTIPLE SCATTERED LIGHT  
AS THE FUNCTION OF WAVELENGTH.**

*O.S. Ougolnikov<sup>1</sup> and I.A. Maslov<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Astro-Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,*

*Profsoyuznaya ul. 84/32, Moscow, 117810 Russia*

*<sup>2</sup>Space Research Institute, Russian Academy of Sciences,*

*Profsoyuznaya ul. 84/32, Moscow, 117810 Russia*

The work is devoted to the investigation of the role of multiple scattering in light twilight in different wavelength and the influence of multiple scattering and scattering at aerosol particles to the polarization of twilight sky background. The work is based on wide-angle polarimetric CCD-observations of the twilight sky near the zenith point in U, B, V and R bands, that were conducted in summer 2000 at South Laboratory of Moscow Sternberg Astronomical Institute.

Basing on obtained data we had determined the fraction of single scattered light at light twilight at the zenith point for U, B and V bands and estimated the lower limit of this value for R band. The analysis of color and polarimetric evolution of sky background was made taking in account single and multiple scattering properties. The height of upper limit of tropospheric aerosol layer in the Earth's atmosphere was obtained also.