

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВКЛАДА АЭРОЗОЛЬНОГО РАССЕЙЯНИЯ В СВЕЧЕНИЕ СУМЕРЕЧНОГО НЕБА

О.С. Угольников^{1,2}, И.А. Маслов^{1,3}

¹Институт космических исследований РАН, Москва

²Астрокосмический центр Физического института РАН, Москва

³Государственный Астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва

Поступила в редакцию 15.03.2004

Работа посвящена изучению и количественной оценке влияния рассеяния прямого солнечного излучения на частицах тропосферного аэрозоля в период светлых сумерек, вблизи восхода и захода Солнца. Основой работы являются поляризационные измерения сумеречного неба в двух широких спектральных полосах, близких к стандартным полосам V и R, проведенные в 2002 и 2003 годах в Южной Лаборатории ГАИШ (Крым). Выделен период сумерек, во время которого однократное аэрозольное рассеяние становится заметным, и указан характер его влияния на интенсивность и поляризацию сумеречного неба. Предложен метод оценки поляризации однократного аэрозольного рассеяния и его вклада в общую яркость фона сумеречного неба на основе дифференциальных характеристик фона вблизи зенита и их корреляций друг с другом.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования атмосферного аэрозоля – самой изменчивой оптической компоненты земной атмосферы – являются основной задачей атмосферного оптического мониторинга и, в частности, измерений сумеречного фона неба [1]. Влияние аэрозольного рассеяния на интенсивность и поляризацию фона неба хорошо известно на качественном уровне и связано, прежде всего, с более слабой (по сравнению с молекулярным рассеянием) зависимостью рассеивающей способности от длины волны, меньшей (а иногда и обратной) поляризацией и сильной вытянутостью индикатрисы рассеяния в направлении распространения падающего излучения. Однако количественный анализ аэрозольного рассеяния на основе наблюдательных данных

сильно затруднен вследствие изначальной неизвестности и изменчивости характеристик аэрозольных частиц. Данная компонента проявляет себя не только рассеянием, но и поглощением солнечного излучения, а также сильно сказывается на многократном рассеянии, что является основной проблемой задачи восстановления свойств аэрозоля по данным оптических измерений.

Методы численного интегрирования уравнения переноса в атмосфере, широко используемые в последнее время благодаря бурному развитию компьютерной техники, базируются на большом количестве входных параметров, значения которых задаются исходя из каких-либо предположений относительно строения атмосферы, что существенно понижает точность восстановления. Поэтому своей значимости не теряют и эмпирические методы, хотя и дающие лишь приближенные результаты, однако в то же время использующие менее жесткую систему предположений. Подобный метод был развит в [2, 3] для вычисления вклада многократного рассеяния в общем фоне сумеречного неба на основе поляризационных измерений. Результаты оказались в хорошем согласии с данными численного интегрирования [4] и объясняли цветовую и поляризационную эволюцию сумеречного неба по мере погружения Солнца под горизонт. Однако, как было отмечено в [3], данный метод применим лишь в том случае, если вклад однократного аэрозольного рассеяния невелик. Это имело место для большей части наблюдений в фиолетовых, синих и желтых лучах, однако в красной области спектра вклад однократного аэрозольного рассеяния оказался весьма значительным. С одной стороны, это затрудняет использование данного метода в том виде, как он был предложен в [2, 3], а с другой – открывает возможности исследования аэрозольного рассеяния. Целью настоящей работы является расширение метода на случай существенного вклада однократного аэрозольного рассеяния и оценка величины вклада этой компоненты сумеречного свечения на основе его поляризационных измерений.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Поляризационные наблюдения сумеречного неба были проведены в 2002-2003 годах в Южной Лаборатории Государственного Астрономического института им. П.К. Штернберга (Крым, Украина). Интенсивность и поляризация сумеречного неба измерялись с помощью широкоугольной (поле зрения $8.4^\circ \times 6.3^\circ$) ПЗС-камеры с вращающимся поляроидом. В утренние сумерки в ноябре-декабре 2002 года и в апреле 2003 года наблюдения проводились в желтой полосе с эффективной длиной волны

около 5250 А, а в утренние и вечерние сумерки в апреле-июне 2003 года – в красной полосе с эффективной длиной волны около 7600 А.

Как и в работах [2, 3] поляризация фона неба будет характеризоваться величиной поляризационного отношения K , равного отношению интенсивностей в плоскостях поляризации, параллельной ($I_{||}$) и перпендикулярной (I_{\perp}) плоскости рассеяния. В сумеречных условиях вблизи зенита вторая из этих величин более однородна по небу, так как для молекулярного рассеяния под углом 90° она значительно больше, чем первая, а угловая функция рассеяния для данного направления поляризации постоянна. Для линейно поляризованного света величина K равна нулю, для неполяризованного – единице, а для обратно поляризованного – превышает единицу. Величина степени поляризации p выражается через K соотношением $p=(1-K)/(1+K)$. Положение Солнца определяется величиной его погружения под горизонт h , отрицательного, если Солнце находится над горизонтом (при этом, как и в [2, 3], рефракция не учитывается). Положение точки на солнечном вертикале определяется величиной зенитного расстояния z , положительного в области зари и отрицательного в противоположной части солнечного вериткала.

На рисунке 1 показана зависимость поляризационного отношения K сумеречного неба в зените от погружения Солнца под горизонт для ряда наблюдений на длине волны 5250 А. Как было показано в [3], вклад однократного аэрозольного рассеяния в данной спектральной области, как правило, невелик. В темные сумерки, при погружении Солнца под горизонт, большем $8-9^\circ$, фон неба составляет только многократно рассеянный свет, поляризация которого слабее (величина K больше). При безлунном небе она остается практически постоянной до погружений Солнца около 11° , когда на сумеречном фоне начинает проступать свечение ночного неба. Поляризация может изменяться ото дня ко дню за счет вариаций многократного рассеяния, в том числе и на атмосферном аэрозоле.

В более светлые сумерки поляризация сумеречного неба усиливается за счет появления однократного рассеяния. При погружении Солнца, меньшем 4° , поляризация вновь выходит на постоянный уровень, хорошо коррелирующий с поляризацией в темные сумерки (кривые на рисунке 1 сдвинуты друг относительно друга, но их форма практически одинакова). Данный факт указывает, что величина поляризации в светлые сумерки также определяется вкладом и поляризацией многократного рассеяния, мало изменяющимся при $h < 4^\circ$. Лишь при восходе Солнца над горизонтом поляризация начинает медленно ослабевать (величина K возрастает), причем особенно хорошо этот эффект заметен для утренних сумерек 25.IV и

26.IV.2003, когда атмосфера была сильно загрязнена. Вклад многократного рассеяния не может существенно увеличиться с восходом Солнца, и данное ослабление поляризации связано с рассеянием прямых солнечных лучей частицами аэрозоля в нижних слоях атмосферы. До восхода Солнца эти слои практически не были освещены его прямыми лучами, внося вклад лишь в многократное рассеяние. Для наблюдений ноября и декабря 2002 года эффект ослабления поляризации с восходом Солнца едва заметен, а утром 11.XII.2002, при наилучших из всех дат атмосферных условиях, практически отсутствует. Это говорит о малости вклада однократного аэрозольного рассеяния для этих дат наблюдений.

Иная ситуация складывается на длине волны 7600 А (рисунок 2). В этой области спектра ослабление поляризации наблюдается практически во все даты и начинается еще до восхода Солнца, при его погружении под горизонт на 2-3°. В это время эффективная высота однократного рассеяния примерно такая же, что и для 5250 А при $h=0-1^\circ$ (около 15 км). В некоторые даты падение поляризации с восходом Солнца весьма значительно и составляет десятки процентов. В эти же дни интенсивность фона сумеречного неба возрастает с восходом Солнца (или убывает с заходом) быстрее, чем в другие даты, как видно на рисунке 3. На длине волны 5250 А данный эффект практически отсутствует, и интенсивность фона неба почти не зависит от состояния атмосферы. Появляющийся в красных лучах избыток интенсивности связан с дополнительным рассеянием солнечного света на атмосферном аэрозоле. Однако, так как аэрозоль проявляет себя также и поглощением света, эффект нельзя напрямую использовать для вычисления вклада аэрозольного рассеяния. Эта оценка будет сделана на основе дифференциальных поляризационных данных в следующем параграфе настоящей работы.

Эволюция поляризации фона неба в зените в более темной фазе сумерек в красной полосе мало отличается от желтой полосы: после погружения Солнца под горизонт на 4-5° вклад однократного рассеяния уменьшается, и величина K увеличивается. Однако, плато при погружениях 8-11° на зависимости $K(h)$ практически отсутствует. Причина этого в том, что интенсивность многократно рассеянного излучения на длине волны 7600 А ниже, а фон ночного неба, наоборот, выше, чем на 5250 А, и ночное небо проступает на сумеречном фоне при меньшем погружении Солнца, ослабляя поляризацию фона неба.

3. ВЫДЕЛЕНИЕ ОДНОКРАТНОГО АЭРОЗОЛЬНОГО РАССЕЙЯНИЯ

Для оценки вклада аэрозольного рассеяния в фоне неба вблизи зенита, появляющегося в светлые сумерки, нужно знать поляризацию аэрозольного рассеяния под углом около 90° , что является главной проблемой настоящей задачи, так как эта величина сильно зависит от свойств аэрозольных частиц, которые заранее неизвестны. Данная проблема мешает нам вычислить поляризацию аэрозольного рассеяния для каждой даты наблюдений отдельно, и мы оценим лишь средние значения этой величины для ансамблей наблюдений одного климатического сезона и длины волны: конец осени – начало зимы (5250 А) и весны – начала лета (7600 А). Данная задача будет решаться методом анализа линейных корреляций между наблюдательными параметрами, полученными в эти периоды. При этом анализе мы не будем рассматривать даты с плохими атмосферными условиями, когда вклад аэрозоля был особенно велик и подвергался существенным вариациям в течение сумерек (такое, в частности, наблюдалось с 25.IV по 27.IV.2003 в обеих спектральных полосах).

Обозначим через $\langle \Delta y / \Delta x \rangle$ коэффициент линейной зависимости величины y от величины x , где обе величины – наблюдаемые параметры, полученные для нескольких или всех дат. Первая из подобных корреляций, хорошо заметная в обеих полосах – связь величины изменения поляризации с восходом (заходом) Солнца dK/dh для периода светлых сумерек ($h < 0^\circ$ на 5250 А и $h < 1^\circ$ на 7600 А) и самой поляризации $K(h)$, причем чем ниже h , то есть чем светлее фаза сумерек, тем резче данная зависимость. Ее график для $h = 0^\circ$ представлен на рисунке 4 (во всех производных дифференциалы угловых величин h и z выражены в радианной мере). Учитывая, что при отсутствии аэрозольного рассеяния поляризация в зените в светлые сумерки практически не изменяется, по этим графикам можно определить величину K для данного случая (как соответствующую $dK/dh = 0$). Как и следует ожидать, эта величина оказывается практически независимой от h .

Другая величина, коррелирующая с содержанием аэрозоля, поляризацией и величиной dK/dh – это производная поляризационного отношения по зенитному расстоянию $dK/dz(h)$. Корреляция двух производных величины K в зените для момента $h = 0$ для дат с невысоким вкладом однократного аэрозольного рассеяния, среди которых проводится анализ, показана на рисунке 5. На рисунке 6 приведены зависимости данной величины от погружения Солнца под горизонт в двух полосах для некоторых из этих дат. Уменьшение производной dK/dz с погружением Солнца есть, в основном, эффект движения точки с максимальной поляризацией по солнечному

вертикалу вслед за Солнцем. Данный эффект стал основой метода разделения однократного и многократного рассеяния, разработанного в [2, 3]. Однако, на рисунке 6б, соответствующем 7600 А, заметно, что с появлением аэрозольного рассеяния величина dK/dz увеличивается, причем тем сильнее, чем меньше h . Тем самым, аэрозольное рассеяние увеличивает модуль отрицательной смешанной производной $d^2K/dzdh$, основной величины предложенного в [3] метода, затрудняя работу этого метода в данной спектральной области. Физически эффект связан с тем, что поляризационное отношение аэрозольного рассеяния k_a достаточно велико (поляризация слабая), а его вклад увеличивается при смещении в область зари, то есть с ростом z , и с восходом Солнца, то есть с убыванием h .

Похожую природу имеет еще одна корреляция – между величиной dK/dh и смешанной производной логарифма яркости неба в плоскости поляризации, перпендикулярной плоскости рассеяния, $d^2 \ln I_{\perp} / dzdh$, наблюдающаяся для обеих спектральных полос (рисунок 7).

Все описанные корреляции можно объяснить тем, что коррелирующие величины зависят от вклада однократного аэрозольного рассеяния, причем если этот вклад невелик, зависимости можно считать линейными. Для их описания введем ряд величин. Пусть j_a – интенсивность однократно рассеянного на аэрозоле излучения, а J_0 – оставшийся фон неба, состоящий из молекулярного и многократного рассеяния, причем обе величины введены для плоскости поляризации, перпендикулярной плоскости рассеяния. Вклад аэрозольного рассеяния в данной плоскости поляризации, то есть величину $j_a / (j_a + J_0)$, обозначим через a . Поляризационное отношение фона неба в этом случае будет равно

$$K = K_0 + a(k_a - K_0) \quad (1),$$

где K_0 – поляризационное отношение «чистого» фона неба, состоящего только из молекулярного и многократного рассеяния.

Примем далее, что при углах рассеяния, близких к 90° , величина k_a мало зависит от угла рассеяния. Это выполняется для реальных аэрозольных частиц, так как их угловая зависимость поляризации плавная, а вблизи угла 90° она достигает максимума [5]. Учитывая, что в зените величина K_0 не зависит от h , производная dK/dh определяется только изменением вклада аэрозольного рассеяния:

$$\frac{dK}{dh} = \frac{da}{dh}(k_a - K_0) \quad (2).$$

Другая производная величина, dK/dz , выражается в виде:

$$\frac{dK}{dz} = (1-a) \frac{dK_0}{dz} + \frac{da}{dz}(k_a - K_0) \quad (3).$$

Учитывая определение величины a , преобразуем ее производную через величины j_a и J_0 . После преобразований формула (3) примет вид:

$$\frac{dK}{dz} = \frac{dK_0}{dz} + a \left((1-a) E_a (k_a - K_0) - \frac{dK_0}{dz} \right) \quad (4),$$

где введено обозначение

$$E_a = \frac{d \ln(j_a / J_0)}{dz} \quad (5).$$

Данную величину можно считать постоянной: она не зависит от содержания аэрозоля и определяется его функцией рассеяния вблизи 90° . Наконец, смешанная производная логарифма яркости неба при поляризации, перпендикулярной плоскости рассеяния

$$\frac{d^2 \ln(j_a + J_0)}{dz dh} = \frac{d^2 \ln J_0}{dz dh} + \frac{da}{dh} E_a \quad (6).$$

Примем в первом приближении, что величина поляризационного отношения «чистого» фона неба K_0 одинакова для всех дат наблюдений, а вклад однократного аэрозольного рассеяния a существенно меньше единицы. Вычислим коэффициент линейной зависимости между смешанной производной яркости неба и производной поляризационного отношения по погружению Солнца, базируясь на формулах (2) и (6):

$$\eta = \left\langle \Delta \left(\frac{d^2 \ln(j_a + J_0)}{dz dh} \right) / \Delta \left(\frac{dK}{dh} \right) \right\rangle = \frac{E_a}{k_a - K_0} \quad (7).$$

Изменение поляризационного отношения с h за счет влияния аэрозоля, как видно из рисунков 1 и 2, близко к линейному (кроме случаев сильно загрязненной атмосферы). Поэтому мы можем считать, что величина a линейно изменяется с h , то есть выполняется соотношение

$$a = \frac{da}{dh} (h - h_0) \quad (8).$$

Здесь h_0 фактически есть максимальное погружение Солнца под горизонт, при котором заметно влияние однократного аэрозольного рассеяния, а производная da/dh практически постоянна, и ее значение меньше нуля. С учетом последнего соотношения можно записать коэффициент наблюдаемой зависимости величины dK/dz от величины dK/dh :

$$\Xi = \left\langle \Delta \left(\frac{dK}{dz} (h) \right) / \Delta \left(\frac{dK}{dh} \right) \right\rangle = (h - h_0) \left((1 - a) E_a - \frac{\frac{dK_0}{dz}}{k_a - K_0} \right) \quad (9).$$

Кроме полученного коэффициента, для нас также важна величина dK/dz , соответствующая случаю $dK/dh=0$, то есть случаю отсутствия однократного аэрозольного рассеяния. Эта величина также может быть получена анализом данной корреляции и есть ни что иное, как производная $dK_0/dz(h)$, входящая в формулы (4) и (9). Обозначим через κ ее значение в точке $h=0$. Это число будет отлично от нуля за счет присутствия многократного рассеяния.

Анализ корреляции двух производных величины K показывает, что в окрестности $h=0$ коэффициент Ξ (9) изменяется линейным образом в зависимости от h . Анализ данной зависимости позволяет вычислить величину h_0 , а также параметр

$$\xi = \frac{d\Xi}{dh} (h = 0) = (1 - a) E_a - \frac{\kappa}{k_a - K_0} \quad (10).$$

По сделанному ранее предположению, для дат наблюдений, принятых к рассмотрению, величина a существенно меньше единицы. Заменяя в последней формуле $(1-a)$ на единицу (фактически пренебрегая членами порядка a^2 в (4)) и подставляя (7) в (10), после преобразований мы получаем квадратное уравнение относительно величины $(k_a - K_0)$:

$$\eta(k_a - K_0)^2 - \xi(k_a - K_0) - \kappa = 0 \quad (11).$$

Для значений параметров η , ξ и κ , полученных из анализа наблюдательных данных в каждой из спектральных полос, уравнение имеет один положительный корень, имеющий физический смысл. Взяв в качестве K_0 характерную величину минимального поляризационного отношения фона неба в светлые сумерки в момент исчезновения аэрозольного рассеяния, то есть при h около 2° для 5250 А и $3-4^\circ$ для 7600 А (рисунки 1 и 2), мы получаем оценку величины k_a . По формуле (1) для каждой из дат наблюдений мы можем также определить и величину a в зависимости от h .

Однако, делаемые таким образом оценки являются лишь первым приближением. Для более точного расчета нам необходимо учесть то, что величина K_0 , вообще говоря, отличается для разных дат наблюдений, а также наличие множителя $(1-a)$ в формулах (4, 9, 10). Для этого, используя полученные в первом приближении оценки $(dK_0/dz)_1$, k_{a1} и $a_1(h)$, в наблюдательные значения $(dK/dh)_{OBS}$ и $(dK/dz)_{OBS}$ вносятся поправки, заменяющие в формулах (2-4) величину $(k_a - K_0)$ на k_a и учитывающие множитель $(1-a)$ отдельно для каждой даты:

$$\left(\frac{dK}{dh}\right)_{CORR} = \frac{da_1}{dh} k_{a1} = \left(\frac{dK}{dh}\right)_{OBS} \frac{k_{a1}}{k_{a1} - K_0} \quad (12),$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dK}{dz}\right)_{CORR} &= \left(\frac{dK_0}{dz}\right)_1 + a_1 \left[E_a k_{a1} - \left(\frac{dK_0}{dz}\right)_1 \right] = \\ &= \left(\frac{dK}{dz}\right)_{OBS} \frac{k_{a1}}{(k_{a1} - K_0)(1 - a_1)} + \left(\frac{dK_0}{dz}\right)_1 \left(1 - a_1 - \frac{k_{a1}}{k_{a1} - K_0} \right) \end{aligned} \quad (13).$$

По новым значениям параметров η_1 , ξ_1 и κ_1 , полученным из этих исправленных данных, вычисляется следующее приближение для поляризационного отношения аэрозольного отношения k_{a2} и зависимостей $a_2(h)$ и $(dK_0/dz)_2$ для каждой даты (только теперь вместо разности $(k_a - K_0)$ в уравнениях (7, 9, 10, 11) будет стоять величина k_a). Указанная цепочка повторяется до достижения требуемой степени сходимости итерационного процесса, причем на каждом этапе в формулы (12, 13) входят изначальные (наблюдательные) значения производных $(dK/dh)_{OBS}$ и $(dK/dz)_{OBS}$.

Получившиеся в результате значения величины k_a и соответствующие им значения степени поляризации аэрозольного рассеяния p_a для обеих спектральных полос приведены в таблице 1. Погрешности определения этих величин, определяемые погрешностями параметров η , ξ и κ , весьма велики, особенно на длине волны 5250 А, что вполне естественно, так как в этой области спектра однократное аэрозольное рассеяние составляет лишь малую примесь к сумеречному фону неба. К примеру, для наблюдений, выполненных в желтой полосе летом 2000 года [3], корреляции вообще замыкаются в инструментальных погрешностях. На длине волны 7600 А, где эффекты аэрозольного рассеяния видны намного отчетливей, погрешность ниже. Несмотря на невысокую точность определения, значение поляризации аэрозольного рассеяния под углом 90° , равное примерно 20%, оказывается в хорошем согласии с экспериментальными данными рассеяния аэрозольными частицами лазерного излучения [5]. Вполне закономерно также, что аэрозольная поляризация увеличивается с длиной волны, хотя разница крайне невелика и существенно меньше погрешности вычислений.

Далее в таблице 1 приведены значения h_0 , верхней границы наблюдения эффектов однократного аэрозольного рассеяния. Эти значения также весьма ожидаемы: при данных погружениях Солнца поляризация выходит на постоянный уровень, принимавшийся нами как поляризация «чистого» фона неба K_0 . Еще раз отметим, что аэрозоль может влиять на величину K_0 , но только посредством многократного рассеяния. В случае отсутствия однократного аэрозольного рассеяния в верхней тропосфере и стратосфере, то есть при $dK/dh=0$, величина K_0 оказывается равной величине K_{00} , также приведенной в таблице (соответствующая степень поляризации обозначена p_{00}) и показанной в виде горизонтальной линии на рисунках 1 и 2.

Знание величины k_a позволяет перейти от величины a , рассчитанной по формуле (1), к величине a_T – вкладу однократного аэрозольного рассеяния уже в полной яркости неба. При этом ее можно вычислять и для случаев большого вклада аэрозольного рассеяния. Зависимости $a_T(h)$ для ряда дат наблюдений в обеих полосах приведены на

рисунке 8. Видно, что предположение о малости вклада однократного аэрозольного рассеяния в желто-зеленой области спектра, сделанное в [3], оправдывает себя, по крайней мере, для дней с хорошей прозрачностью атмосферы (для утренних сумерек 25 и 26.IV.2003 оно заведомо неверно). На длине волны 7600 А ситуация значительно сложнее, но именно в этой полосе имеет смысл исследовать аэрозольное рассеяние при различных погружениях Солнца, что могло бы дать информацию о высотном профиле аэрозоля.

Анализ корреляций величины dK/dz при различных погружениях Солнца с величиной dK/dh позволила нам также определить зависимость $dK_0/dz(h)$ для случая особо чистой атмосферы – отсутствия однократного аэрозольного рассеяния на всех этапах сумерек ($dK/dh=0$). Данные зависимости для обоих цветов показаны жирными линиями на рисунке 6. Дифференцируя функцию dK_0/dz по h , мы получаем смешанную производную, значения которой приведены в таблице 1. К этим данным (с учетом величины K_{00}) уже вполне может быть применен метод разделения молекулярного и многократного рассеяния [2, 3]. Результаты расчетов также приведены в таблице: величины A и A_T есть вклад однократного молекулярного рассеяния в фон «чистого» неба для плоскости поляризации, перпендикулярной плоскости рассеяния, и для полного фона, соответственно, величины q и p_m – поляризационное отношение и степень поляризации многократно рассеянного света в зените в момент восхода и захода Солнца для случая особо чистой атмосферы. Все параметры, полученные для этого случая на длине волны 5250 А, близки к данным для утренних сумерек 11.XII.2002, отличавшихся исключительно высокой прозрачностью атмосферы и максимальной поляризацией как сумеречного, так и предшествующего ночного неба [6]. Поляризация фона неба в период темных сумерек, соответствующая «плато» зависимости $K(h)$ для этой даты (h от 8° до 11°), с точностью до тысячных долей совпадает с полученным значением q для особо чистой атмосферы, что говорит о практической неизменности поляризации многократного рассеяния в течение всего периода сумерек в подобных условиях (величина q также показана в виде горизонтальной линии на рисунках 1 и 2).

Следует обратить внимание, что вопреки тенденции к уменьшению вклада многократного рассеяния с ростом длины волны, найденной в [3], на длине волны 7600 А он оказался таким же, как и для 5250 А. Эффект связан с тем, что даже в модели «чистого» фона неба, когда мы не наблюдаем аэрозольного рассеяния прямых солнечных лучей на высотах порядка 15 км, велико влияние многократного рассеяния

на приземном аэрозоле, особенно в красной области спектра, что сильно сказывается на яркости и поляризации многократно рассеянной компоненты и всего фона неба.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был предложен эмпирический подход к одной из самых сложных проблем метода «сумеречного зондирования» атмосферы Земли – выделение аэрозольного рассеяния. Сложность задачи состоит в априорной неизвестности параметров аэрозольного рассеяния, которые нужно находить одновременно с величиной вклада этой компоненты в общий фон сумеречного свечения. Данная задача решалась для двух спектральных полос с эффективными длинами волн 5250 и 7600 А. Первая из этих полос находится на длинноволновом крае обширного интервала, охватывающего почти всю видимую часть спектра, в котором вклад однократного аэрозольного рассеяния в сумерках в устойчивую ясную погоду крайне мал, и всю динамику сумеречных явлений можно описать комбинацией молекулярного и многократного рассеяния [3]. Именно это стало основной причиной низкой точности вычисления поляризации аэрозольного рассеяния для 5250 А. Лишь в красной области спектра происходит качественное изменение, позволяющее выделять и измерять параметры рассеяния на аэрозольных частицах.

Появление аэрозольного рассеяния несколько изменяет классификацию основных этапов сумерек. Стадия светлых сумерек, продолжающаяся до погружения Солнца под горизонт на $4-5^\circ$ и характеризующаяся в условиях чистой атмосферы практически постоянным вкладом многократного рассеяния, медленным изменением цвета и неизменной поляризацией, подразделяется на два периода. Первый, более светлый, продолжается до погружения Солнца на $1-2^\circ$ на длине волны 5250 А и примерно 3° на длине волны 7600 А. В это время заметно влияние однократного аэрозольного рассеяния, постепенно уменьшающееся с погружением Солнца. Аэрозольное рассеяние существенно влияет на поляризацию и на распределение интенсивности фона неба вблизи зенита, а до захода (после восхода) Солнца на 7600 А – и на саму интенсивность фона. Лишь во вторую, более темную стадию светлых сумерек, когда эффективная высота рассеяния становится больше 15-20 км, эффекты аэрозольного рассеяния исчезают, а поляризация выходит на более-менее постоянный уровень в преддверии быстрого ослабления в следующую стадию сумерек из-за роста вклада многократного рассеяния. В красной области спектра этот период становится весьма

кратковременным, что вызывает некоторые затруднения при оценке поляризационного отношения фона без аэрозольного рассеяния K_0 .

Выводы [3] и настоящей работы показывают, что рост вклада однократного рассеяния в общем фоне неба и усиление поляризации, происходящие от синей к желтой области спектра, далее замедляются из-за растущего вклада тропосферного аэрозоля в многократно рассеянную компоненту. Здесь же появляются эффекты однократного аэрозольного рассеяния, являющиеся главным предметом исследований. По-видимому, эти эффекты должны быть еще сильнее в ближней инфракрасной области спектра, поэтому там можно ожидать и улучшения точности предложенного здесь метода. Но при этом нужно иметь в виду, что в инфракрасной области спектра мы столкнемся с новой динамикой сумеречного явления. Аэрозольное рассеяние будет заметно в течение всего периода светлых сумерек вплоть до стадии начала роста вклада многократного рассеяния при h около 5° , и обособленный период постоянной поляризации между ними может не наступить.

Несмотря на указанные трудности, большая статистика наблюдений в различных спектральных интервалах может решить проблему низкой точности определения характеристик аэрозольного рассеяния, и предложенный в настоящей работе метод, таким образом, расширит возможности оптических аэрозольных исследований в период сумерек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг Г.В. Сумерки. М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры. 1963
2. Угольников О.С. Фотометрия и поляриметрия сумеречного неба. Проблема многократного рассеяния света в период сумерек // Космические исследования. 1999. Т. 37. № 2. С. 168-175.
3. Угольников О.С., Маслов И.А. Многоцветная поляриметрия сумеречного неба. Роль многократного рассеяния света как функция длины волны // Космические исследования. 2002. Т. 40. № 3. С. 242-251.
4. Postulyakov O.V., Ugolnikov O.S., Maslov I.A., Sidorchuk A.A. Polarization of Twilight Sky: Measurements, Empirical Model, Radiative Transfer Simulation and Application to Aerosol Profile Retrieval // Geophysical Research Abstracts. 2003. V. 5. P. 13842
5. Volten H., Munoz O., Waters R., Van der Zande W., Hovenier J. Online Database of Scattering Matrices of Irregular Particles // Abstracts of NATO Advanced Study Institute on Photopolarimetry and Remote Sensing and Workshop on Remote Sensing Techniques and Instrumentation: International Cooperation. Army Research Laboratory. 2003. P. 103; <http://www.astro.uva.nl/scatter>.
6. Угольников О.С., Маслов И.А. Широкоугольная поляриметрия ночного неба. Измерения свечения атмосферы и зодиакального света // Космические исследования. 2004 (в печати).

Параметр	5250 А	7600 А
k_a	0.69 ± 0.37	0.63 ± 0.17
p_a	0.18 ± 0.26	0.23 ± 0.13
$h_0, ^\circ$	1.99 ± 0.38	3.44 ± 0.35
K_{00}	0.110 ± 0.009	0.096 ± 0.013
p_{00}	0.802 ± 0.015	0.825 ± 0.022
$d^2 K_0/dzdh$	-1.357 ± 0.011	-1.290 ± 0.036
A	0.667 ± 0.005	0.657 ± 0.018
A_T	0.618 ± 0.008	0.617 ± 0.019
q	0.271 ± 0.028	0.222 ± 0.040
p_m	0.574 ± 0.034	0.637 ± 0.053

Таблица 1. Характеристики различных составляющих сумеречного неба на длине волны 5250 А (ноябрь-декабрь 2002 г.) и 7600 А (апрель-июнь 2003 г.)

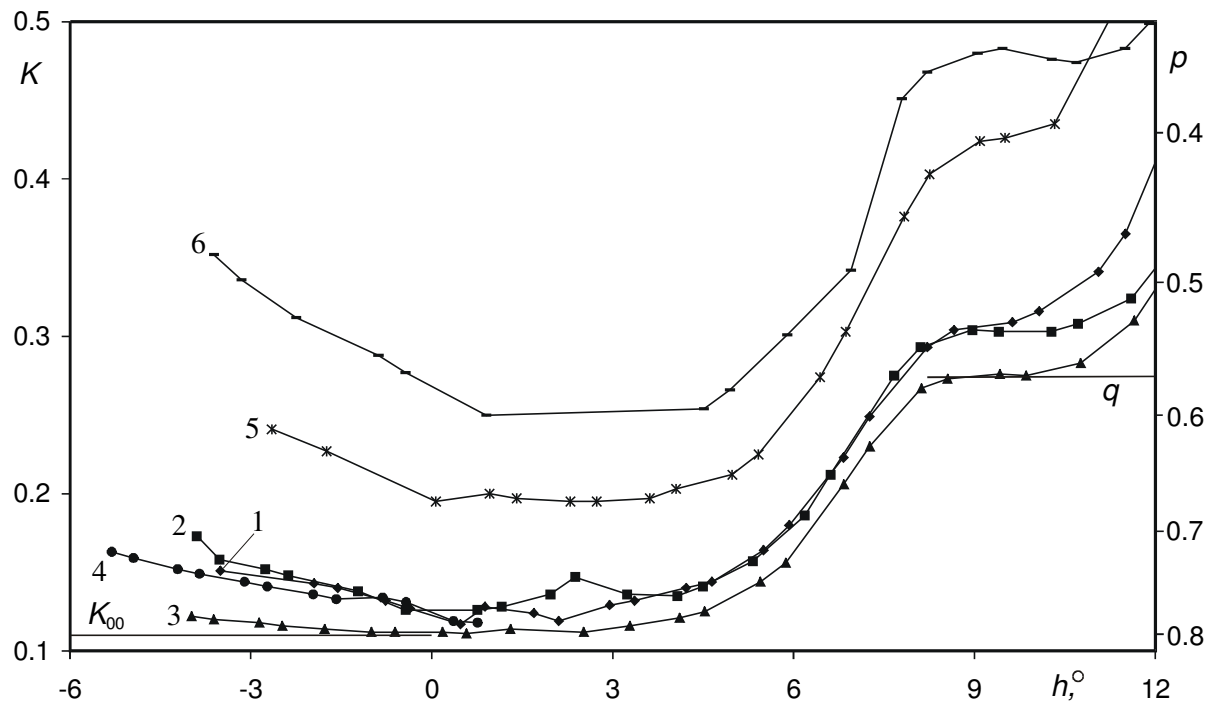


Рисунок 1. Поляризационное отношение сумеречного неба в зените в зависимости от погружения Солнца на длине волны 5250 А (1 – утренние сумерки 30.XI.2002, 2 – 09.XII.2002, 3 – 11.XII.2002, 4 – 16.XII.2002, 5 – 25.IV.2003, 6 – 26.IV.2003).

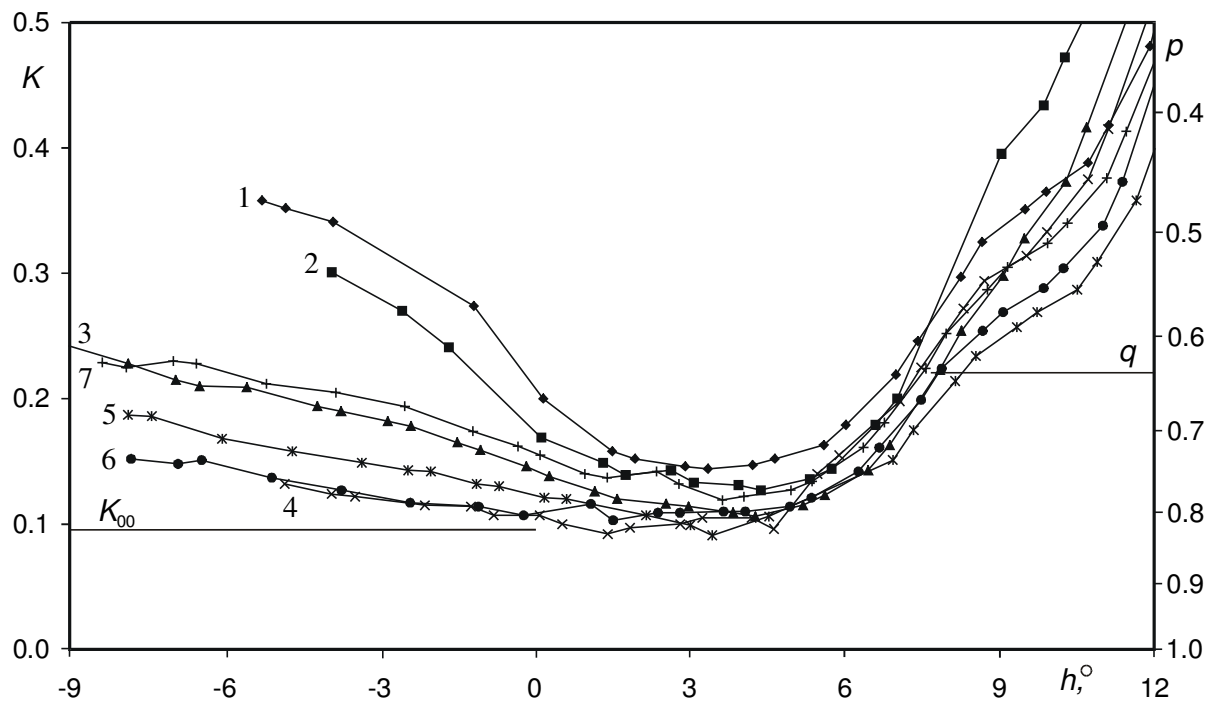


Рисунок 2. Поляризационное отношение сумеречного неба в зените в зависимости от погружения Солнца на длине волны 7600 А (1 – утро 27.IV, 2 – вечер 27.IV, 3 – вечер 29.IV, 4 – утро 01.V, 5 – утро 05.V, 6 – утро 06.V, 7 – утро 07.V.2003).

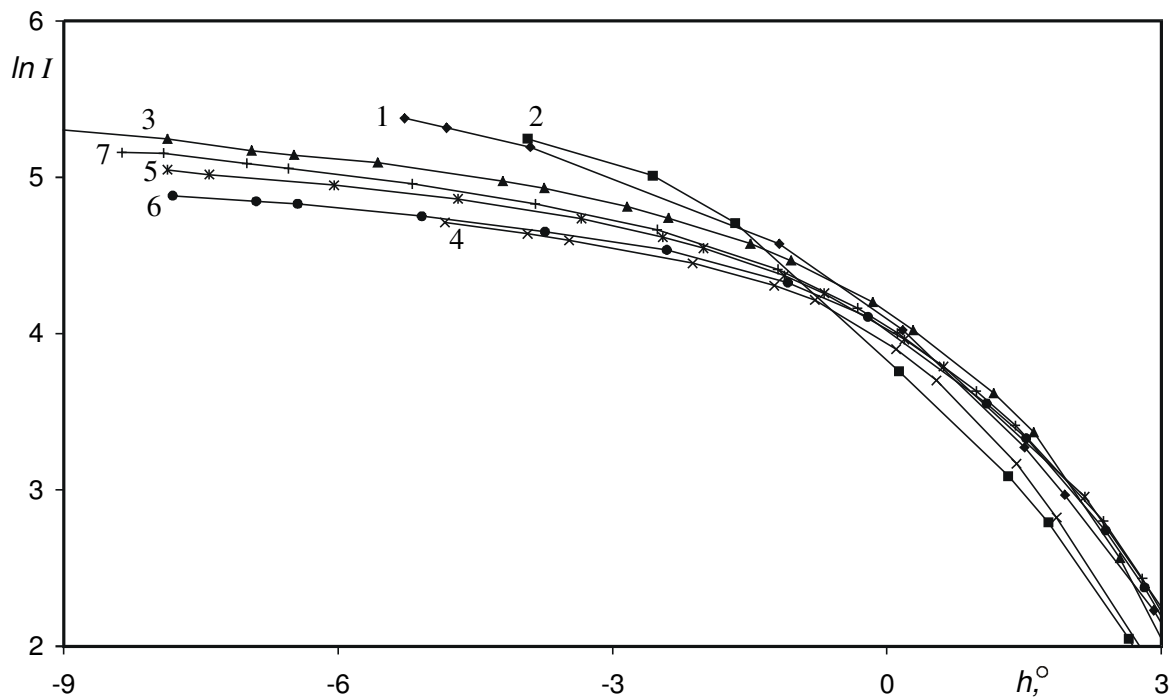


Рисунок 3. Логарифм яркости сумеречного неба (в относительных единицах) в зените в зависимости от погружения Солнца на длине волны 7600 А. Обозначения аналогичны рисунку 2.

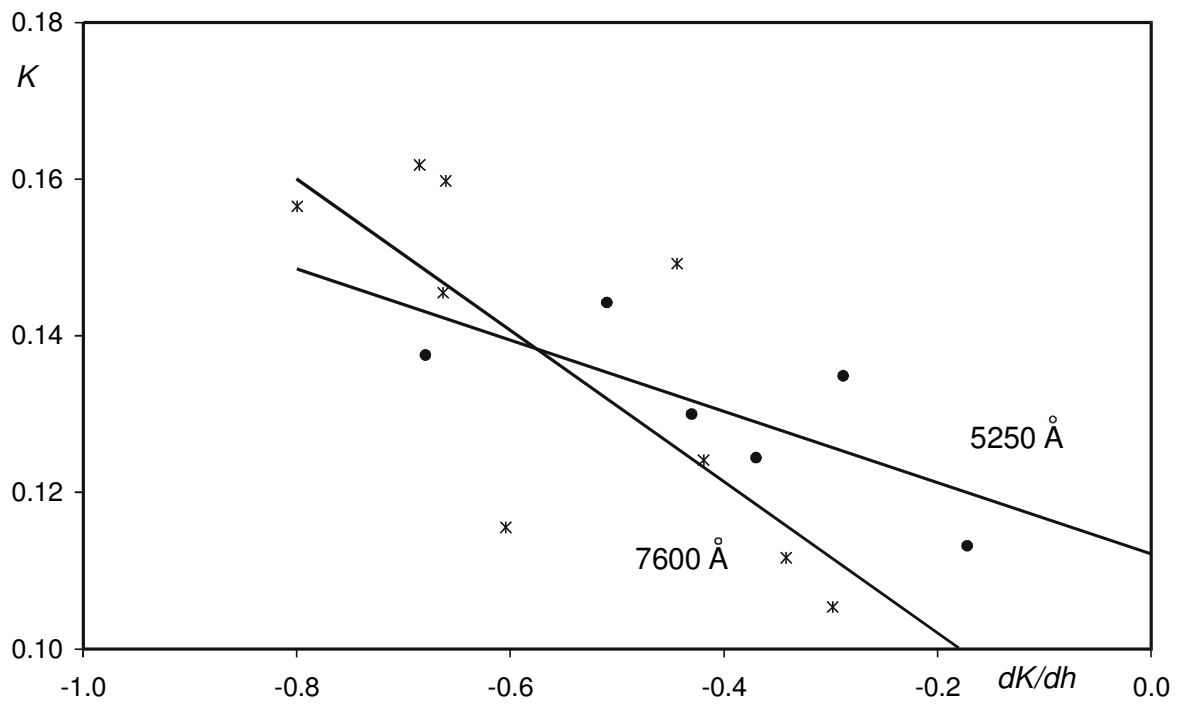


Рисунок 4. Корреляция величин dK/dh и K в зените в момент $h=0$ в двух спектральных полосах.

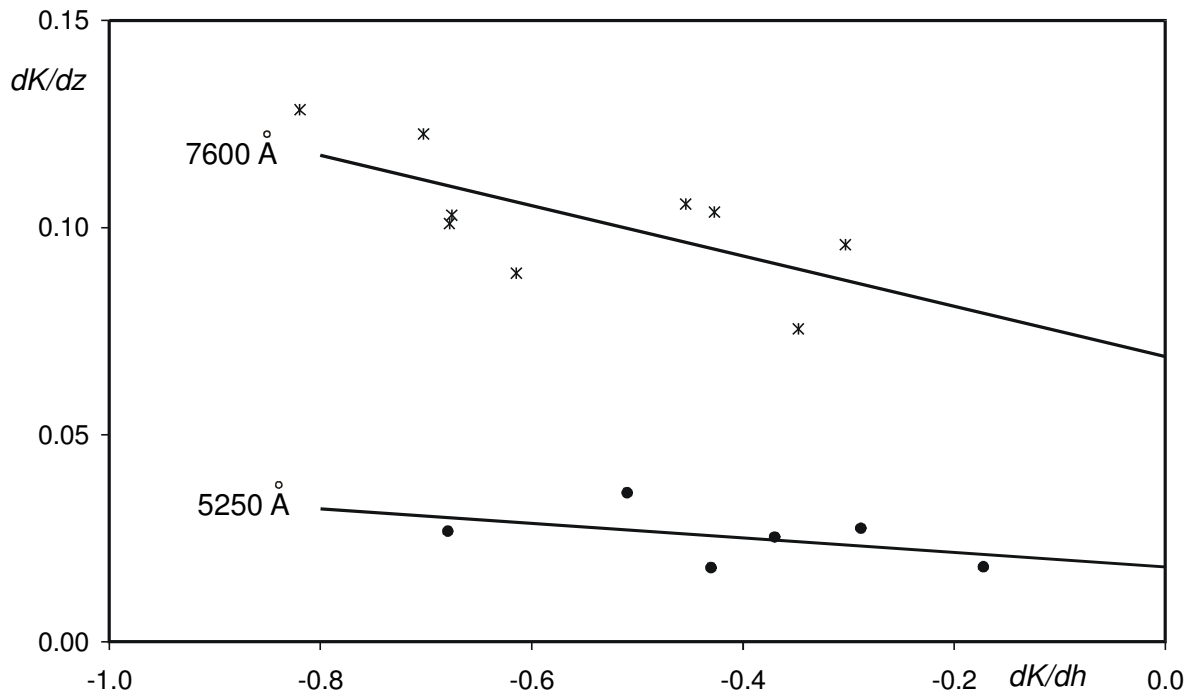
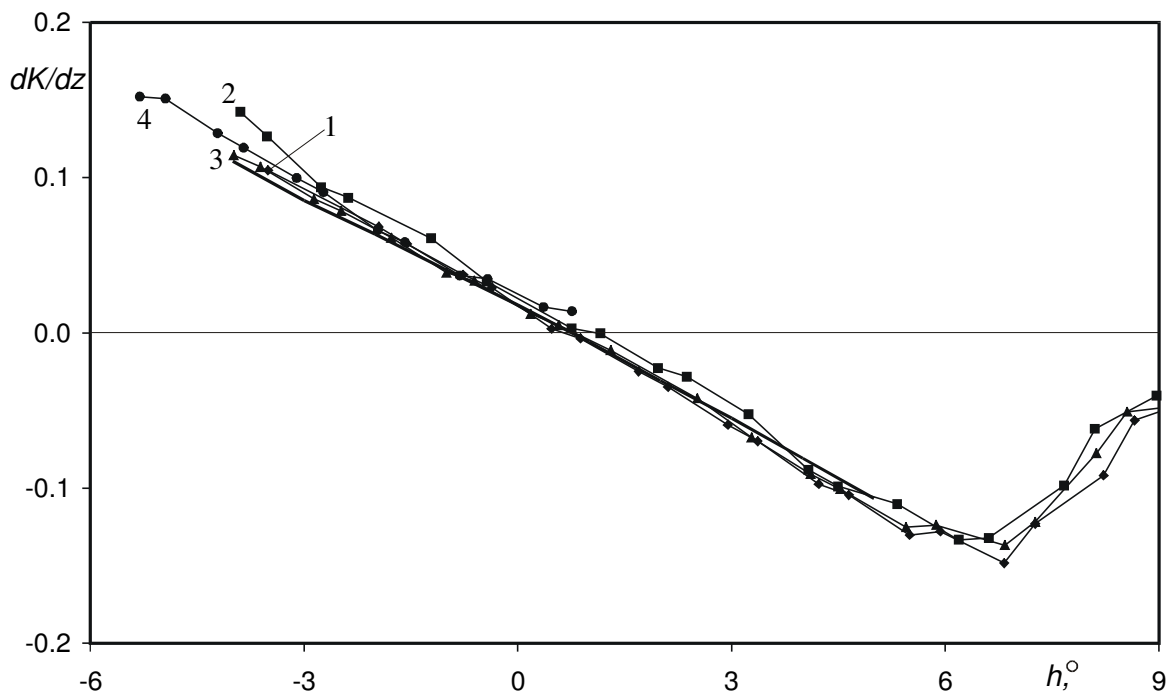
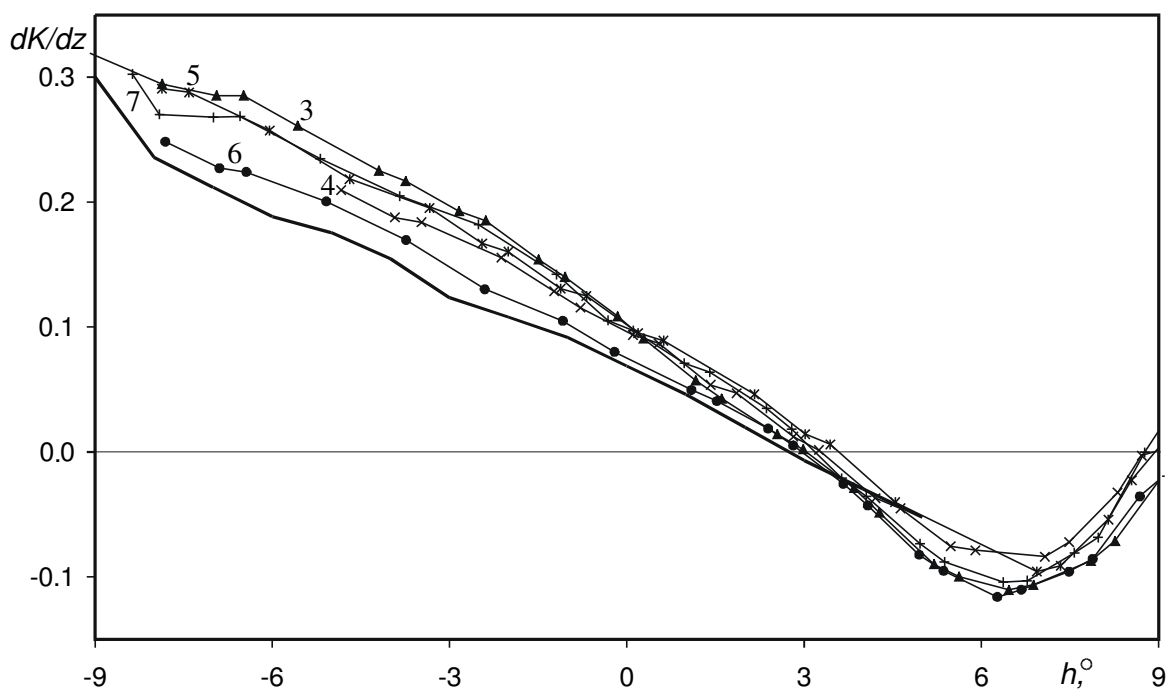


Рисунок 5. Корреляция величин dK/dh и dK/dz в зените в момент $h=0$ в двух спектральных полосах.



(a)



(b)

Рисунок 6. Зависимость величины dK/dz от погружения Солнца под горизонт для ряда дат наблюдений на длине волны 5250 А (а) и 7600 А (б). Обозначения аналогичны рисункам 1 и 2, соответственно. Жирная линия соответствует случаю отсутствия однократного аэрозольного рассеяния.

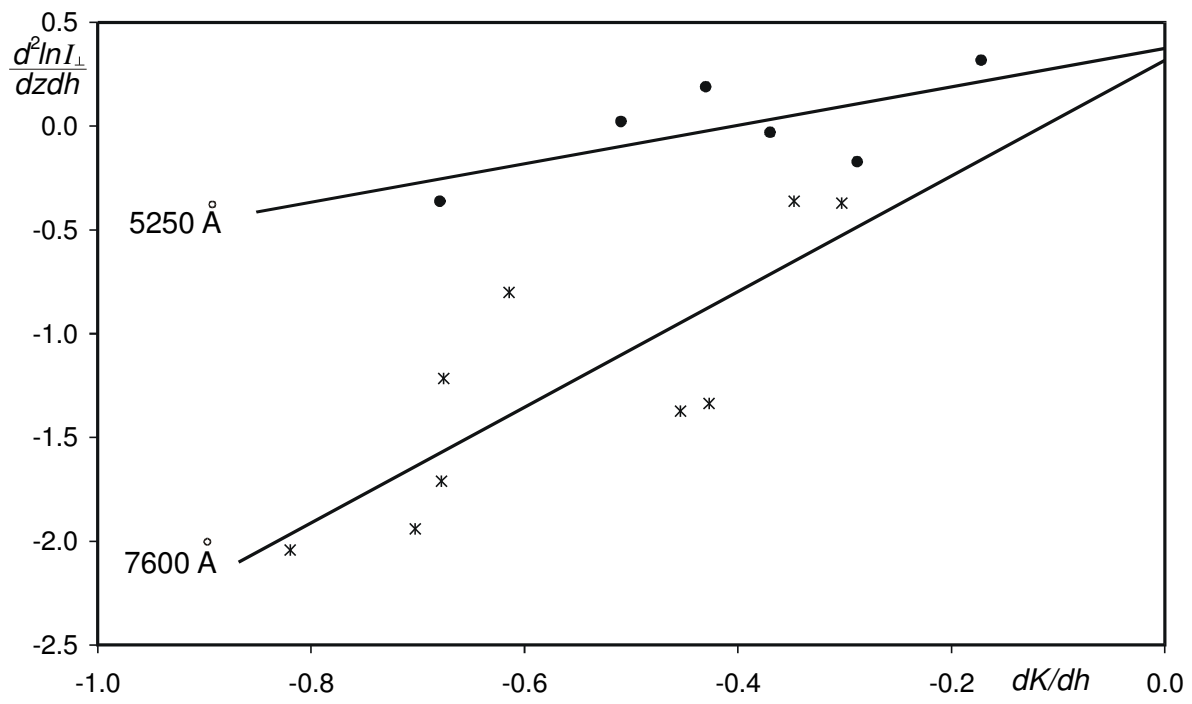
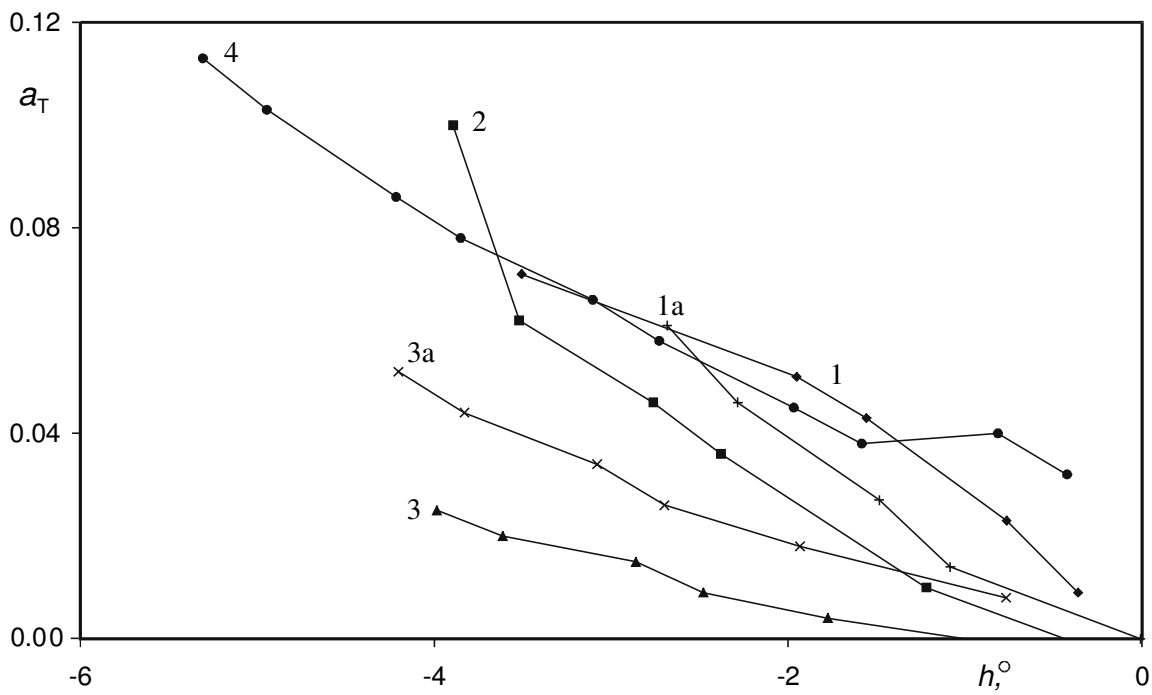
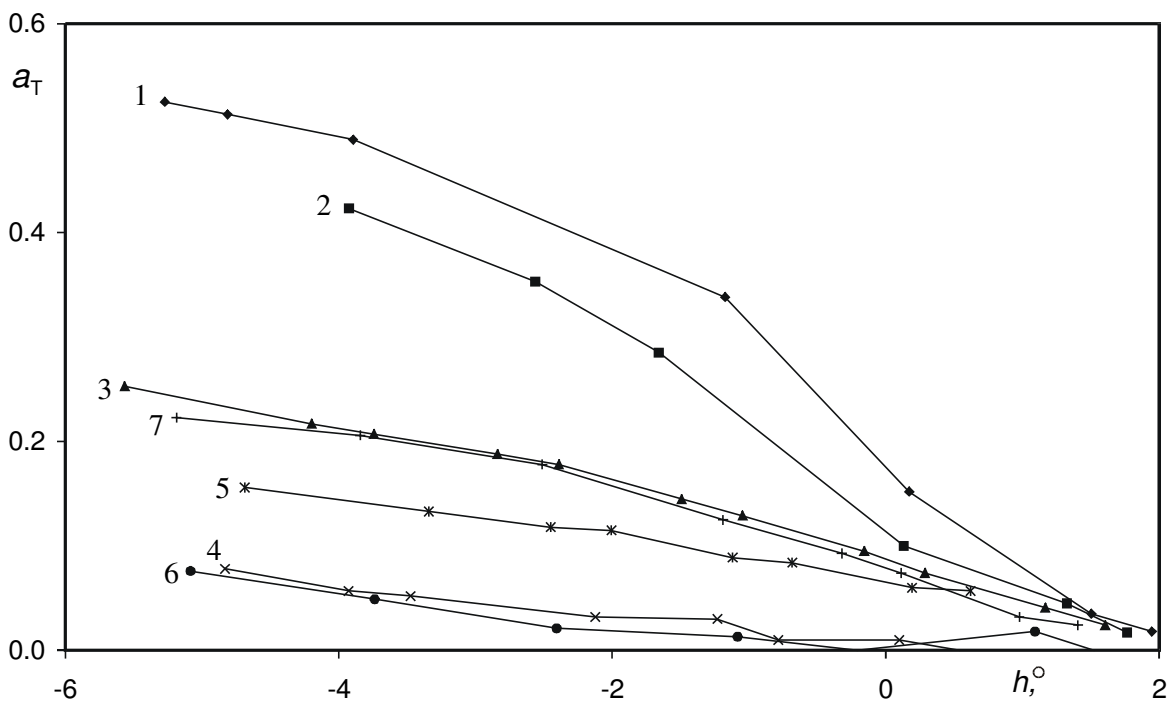


Рисунок 7. Корреляция величин dK/dh и $d^2 \ln I_1 / dz dh$ в зените в момент $h=0$ в двух спектральных полосах.



(a)



(b)

Рисунок 8. Вклад однократного аэрозольного рассеяния в яркость неба в зените в зависимости от величины h на длине волны 5250 А (а) и 7600 А (б). Обозначения аналогичны рисункам 1 и 2, соответственно, 1а – утро 27.XI.2002, 3а – утро 10.XII.2002.

POLARIZATION INVESTIGATIONS OF AEROSOL SCATTERING CONTRIBUTION INTO THE TWILIGHT GLOW

O.S. Ugolnikov^{1,2}, and I.A. Maslov^{1,3}

¹Space Research Institute, Profsoyuznaya st., 84/32, 117997 Moscow, Russia

²Astro-Space Center, Lebedev's Physical Institute, Profsoyuznaya st., 84/32,
117997 Moscow, Russia

³Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Universitetsky pr., 13, 119899,
Moscow, Russia

The work is devoted to the investigation and numerical estimation of the influence of direct solar light scattering on the tropospheric aerosol particles during the light twilight period, near the sunrise and sunset. The work is based on the polarization twilight sky measurements conducted in 2002 and 2003 at the South Laboratory of Sternberg Astronomical Institute (Crimea). The twilight stage, when the single aerosol scattering becomes noticeable, was found, and the kind of its influence on the intensity and polarization of the twilight sky was described. The method of estimation of single aerosol scattering polarization and its contribution into the twilight background intensity based on differential characteristics of the background near the zenith and their correlations, was suggested.