

Оптические свойства невозмущенной мезосферы на основе широкоугольной поляриметрии фона сумеречного неба

О.С. Угольников¹, И.А. Маслов^{1,2}

¹ФГБУН Институт космических исследований РАН, Москва

²ГНУ Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва

В работе описываются результаты первых широкоугольных поляризационных измерений фона сумеречного неба в центральной России в начале лета 2011 года. Быстрые измерения интенсивности и поляризации фона неба в широком диапазоне зенитных расстояний используются для выделения однократного и многократного рассеяния и построения высотной зависимости коэффициента рассеяния и его поляризации в мезосфере (высоты от 60 до 90 км) для разных углов рассеяния. Невозмущенная структура мезосферы без заметных аэрозольных слоев позволяет оценить температуру на данных высотах.

Ключевые слова: фон сумеречного неба; поляризация; рассеяние; мезосфера.

1. Введение

Сумеречное зондирование атмосферы Земли является хорошо известным методом изучения ее оптической структуры. Данный метод используется уже больше века, первая численная теория была построена в 1923 году [1, стр.7]. До начала эпохи лидарных, самолетных и спутниковых измерений этот метод (наряду с наблюдениями метеоров) был единственным способом изучения верхних слоев атмосферы.

В настоящее время метод остается актуальным для ряда атмосферных слоев, в частности, для мезосферы. Этот слой слишком высок для самолетов и большей части лидаров, но при этом слишком низок и плотен для полета спутников. Он также характеризуется высокой прозрачностью, что затрудняет его удаленное зондирование на основе измерений поглощения излучения (эффективных для тропосферы и стратосферы). Основным методом оптического изучения мезосферы является измерение рассеянной радиации.

Мезосфера является промежуточным слоем между плотной нижней частью атмосферы и ее разреженными внешними слоями, обладающими принципиально иными физическими свойствами. Частицы космической пыли, встречающиеся с Землей, задерживаются в мезосфере, причем малые частицы теряют в ней кинетическую энергию, не сгорая. Плотность таких частиц возрастает после максимумов больших метеорных потоков [2, стр.1585]. Мезосфера также является наиболее холодным атмосферным слоем. Летние значения температур в средних широтах могут опускаться до 180 К. В таких условиях возможно образования полярных мезосферных (или серебристых) облаков, самых высоких в атмосфере Земли. Роль ядер конденсации для них могут играть частицы космической пыли.

Основным преимуществом сумеречного метода зондирования атмосферы является возможность одновременных измерений фона неба в его разных точках в течение всего периода сумерек. Это позволяет определить функцию рассеяния единицы объема в широком диапазоне углов рассеяния, что труднее сделать с помощью лидарных или космических измерений. Рост высоты тени Земли по ходу сумерек, достаточно быстрый по сравнению со временем изменения свойств атмосферы, позволяет охватывать широкий диапазон высот.

Возможности сумеречного неба для исследований мезосферы обсуждались в течение многих лет [3, стр.291]. Основным фактором, ограничивающим диапазон высот, является многократное рассеяние солнечного излучения, прежде всего, в нижних слоях атмосферы. По оптимистическим оценкам, вклад однократного рассеяния остается существенным в

течение всего периода сумерек, что расширяет диапазон высот вплоть до термосферы. С другой стороны, анализ наблюдательных эффектов [4, стр.115] и более точное численное моделирование, ставшее возможным лишь недавно [5, стр.300], ограничивает рабочий диапазон метода мезопаузой.

Измерение поляризации фона сумеречного неба расширяет информацию о свойствах рассеивающей среды на разных высотах и одновременно уточняет процедуру отделения многократно рассеянной компоненты. Основа поляризационного метода заложена в работе [6, стр.198]. Поляризационные данные использовались для определения вклада многократного рассеяния в период светлых сумерек [7, стр.171, 8, стр.248], этот вклад оказался большим, чем считалось ранее [3, стр.298], но его значение оказалось в хорошем согласии с данными численного интегрирования [9, стр.237]. Ход величины поляризации фона сумеречного неба определялся, в основном, изменениями соотношения интенсивностей однократного (молекулярного и аэрозольного) и многократного рассеяния [10, стр.1459].

Измерения поляризации фона неба вблизи зенита позволили обнаружить появление пылевой компоненты в стратосфере [11, стр.202] и мезосфере [10, стр.1460], что было связано с извержением вулкана Рабаул в 2006 году и мощным максимумом метеорного потока Леониды в 2002 году соответственно. Небольшое поле зрения камеры (около 8°) не позволило изучить эти рассеивающие компоненты количественно и построить для них матрицы рассеяния. В настоящей работе обсуждаются первые результаты широкоугольных измерений поляризации фона сумеречного неба с особым акцентом на период темных сумерек и самый высокий слой атмосферы, который может изучаться подобным образом – верхнюю мезосферу.

2. Наблюдения.

Широкоугольные поляризационные измерения фона неба были начаты в центральном районе России (55.2° с.ш., 37.5° в.д.), в 60 км к югу от Москвы. Измерительный прибор представляет собой объектив типа «рыбий глаз» с двумя переходными линзами и ПЗС-матрицей Sony DSI-Pro. Вращающийся поляризационный фильтр установлен вместе с системой переходных линз, что обеспечивает малый осевой угол при прохождении света сквозь фильтр. Зеленый фильтр Meade G и ИК-блокирующий фильтр выделяли полосу с эффективной длиной волны 540 нм и шириной около 100 нм. Диаметр поля зрения камеры составлял около 140° . Ось камеры направлялась в зенит, точные параметры ориентации определялись по изображениям звезд в период темных сумерек и ночи. Измерения начинались вечером до захода Солнца, продолжались всю ночь и заканчивались утром после восхода Солнца. Величина экспозиции менялась от 0.001 секунды в светлый период до 15 секунд вблизи полуночи. Частота съемки составляла 1 кадр в 2 секунды в светлые сумерки (что существенно больше аналогичной величины во всех предшествующих экспериментах) и уменьшалась до 1 кадра в 18 секунд ночью. Поляризационный фильтр поворачивался на 120° каждые 20 секунд в светлые сумерки и каждые 2 минуты ночью. Данный интервал содержал серию из нескольких кадров, а интервал интерполяции для вычисления величины поляризации был существенно короче характерного времени изменения яркости сумеречного неба.

Данная работа основана на данных двух последовательных ночей 31.V и 1.VI.2011. Эти ночи характеризовались стабильной ясной погодой и высокой прозрачностью атмосферы. Они также совпали с новолунием (1.VI.2011), и фон сумеречного неба не содержал компоненты, связанной с рассеянием лунного света. Период раннего лета особо интересен тем, что он совпадает с сильным выхолаживанием верхней мезосферы перед появлением в ней серебристых облаков. В это время в средних широтах период сумерек не прерывается даже в полночь, но он содержит длинный отрезок темных сумерек (зенитное расстояние Солнца z_0 более $99-100^\circ$). Это увеличивает временную плотность данных и точность метода.

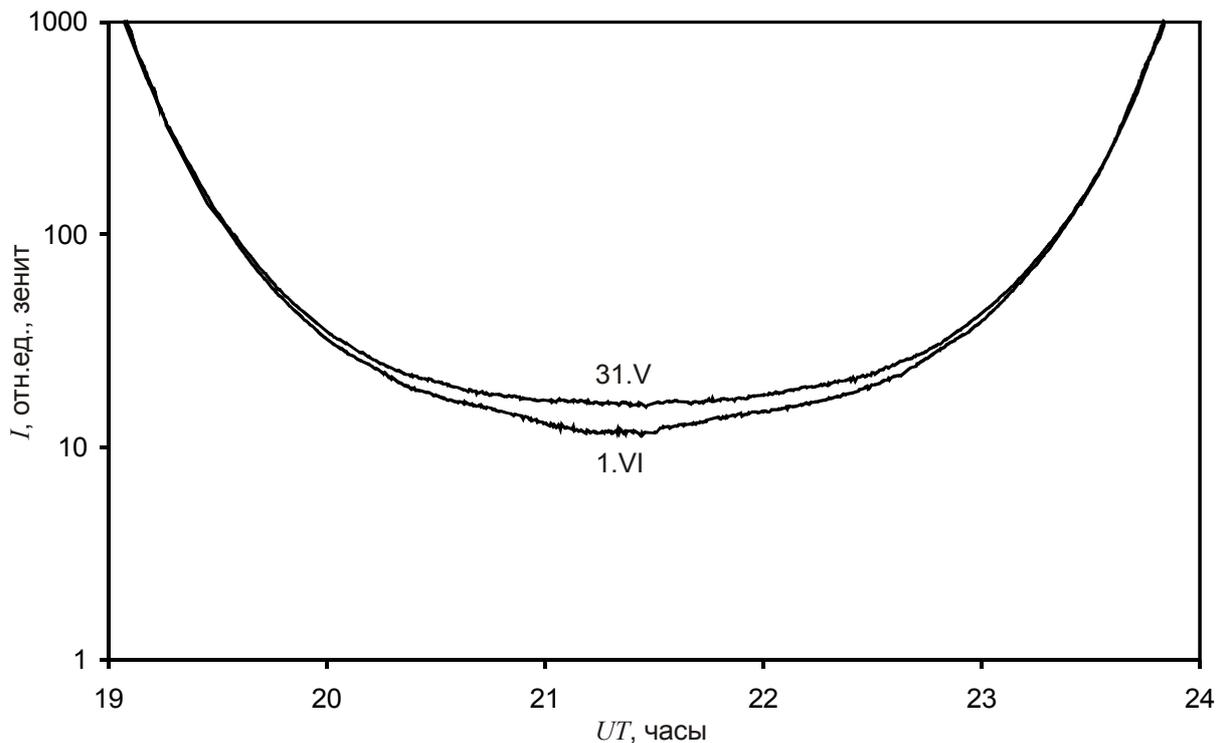


Рисунок 1. Интенсивность фона сумеречного неба в зените в зависимости от времени в течение двух ночей с 31.V и 1.VI.2011. Эффект частного солнечного затмения заметен вблизи локальной полуночи в ночь с 1.VI.

На рисунке 1 показаны зависимости интенсивности фона неба в зените от Всемирного времени (UT) в течение обеих ночей. Кривые достаточно близки друг к другу, но яркость неба в ночь с 1.VI характеризуется более глубоким полночным минимумом, вызванным частным солнечным затмением, произошедшим в эти часы и уменьшившим приток солнечного излучения в атмосферу примерно в 2 раза. Так как это затмение не было полным и произошло в период темных сумерек при доминирующем вкладе многократного рассеяния, оно вызвало одинаковое уменьшение рассеянного фона по всему небу, что не сказалось на полученных далее характеристиках рассеяния света в мезосфере.

Геометрия однократного рассеяния в период сумерек показана на рисунке 2. Зенитное расстояние Солнца z_0 превосходит 90° , и нижние слои атмосферы над наблюдателем (точка O) погружены в тень Земли. Более того, солнечное излучение, проходящее над границей тени сквозь приземные слои атмосферы, испытывают существенное ослабление.

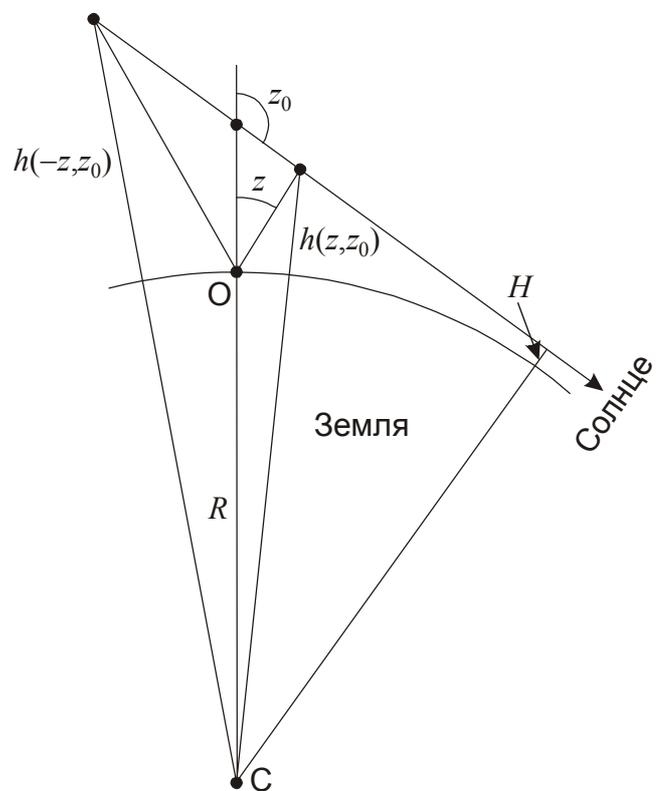


Рисунок 2. Геометрия однократного рассеяния света в период сумерек

Эффективное рассеяние света соответствует траектории, проходящей на минимальной высоте H над поверхностью Земли (модель «сумеречного луча» [3, стр.242]). В период темных сумерек на длине волны 540 нм эта величина составляет 18 км (значение вычисляется с учетом полос Шапюи поглощения озона при его общем содержании 300 единиц Добсона).

Такое значение величины H позволяет в некотором приближении пренебречь атмосферной рефракцией, так как максимальный угол рефракции ρ (для луча, горизонтально идущего сквозь нижнюю атмосферу на данной высоте и достигающего затем мезосферы) равен около $6'$ или $2 \cdot 10^{-3}$ радиан, что составляет всего 40% от видимого радиуса Солнца. Уменьшение высоты точки рассеяния не превзойдет $R(z_0 - \pi/2)\rho$ или 2 км (здесь R – радиус Земли), что меньше вертикального разрешения сумеречного метода зондирования мезосферы.

Обозначим зенитное расстояние точки измерения как z . Пусть эта точка располагается на солнечном вертикале, и значение z положительно в области зари и отрицательно в противоположной части неба. Когда Солнце располагается вблизи горизонта, сумеречный луч почти горизонтален, и эффективная высота рассеяния $h(z, z_0)$ не обладает сильной зависимостью от z . Ситуация меняется в период темных сумерек, когда эта зависимость усиливается и приводит к существенному преобладанию яркости в области зари (рисунок 2) с положительным значением z .

Этот эффект проявляется на рисунке 3, где показана зависимость отношения величин яркости в симметричных точках солнечного вертикала $I(z)/I(-z)$ от зенитного расстояния Солнца для вечерних сумерек 31.V, $z = 50^\circ$. Это отношение действительно возрастает до зенитного расстояния Солнца 97° , однако далее начинает уменьшаться. Этот эффект наблюдался ранее [7, стр.172] и не может быть связан с однократным рассеянием (даже если предположить это, тогда рассеивающие свойства верхней атмосферы не должны существенно зависеть от высоты, но в этом случае сумеречное небо не должно темнеть с дальнейшим погружением Солнца под горизонт). В этот период доминирующей компонентой становится многократное рассеяние. При зенитных расстояниях Солнца более 100° отношение яркостей уменьшается по линейному закону и становится постоянным, если из интенсивности вычесть компоненту фона ночного неба, уже заметную в этот период.

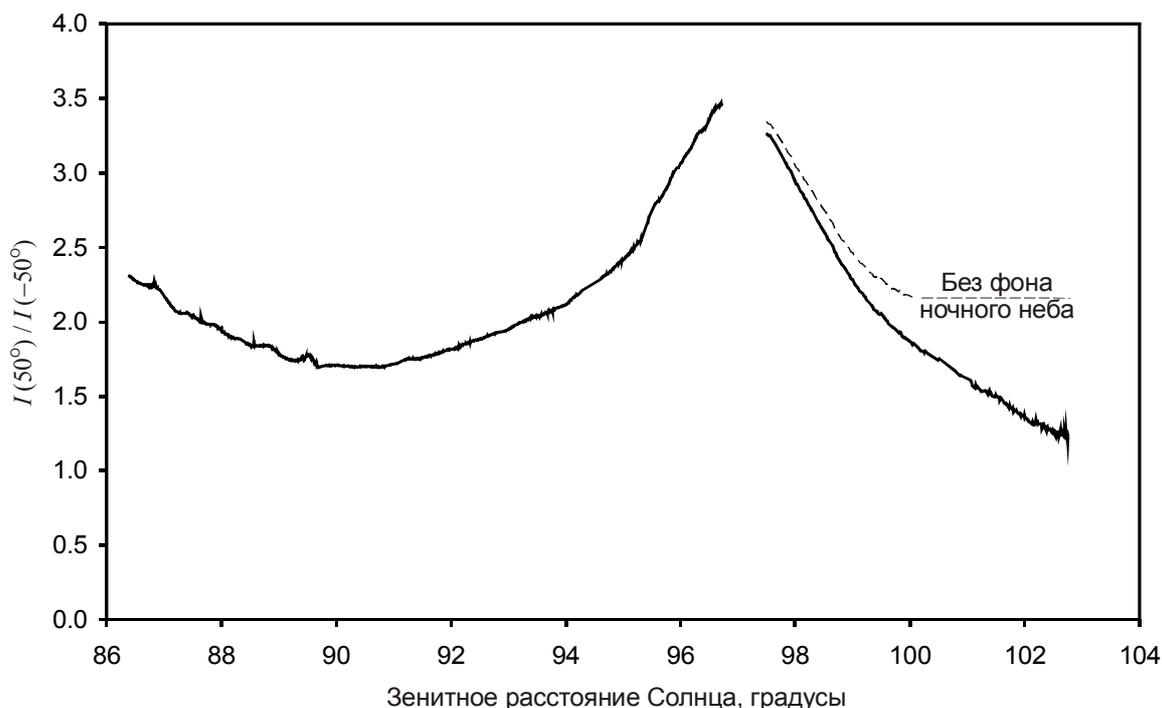


Рисунок 3. Отношение интенсивностей фона неба в симметричных точках солнечного вертикала в вечерние сумерки 31.V.

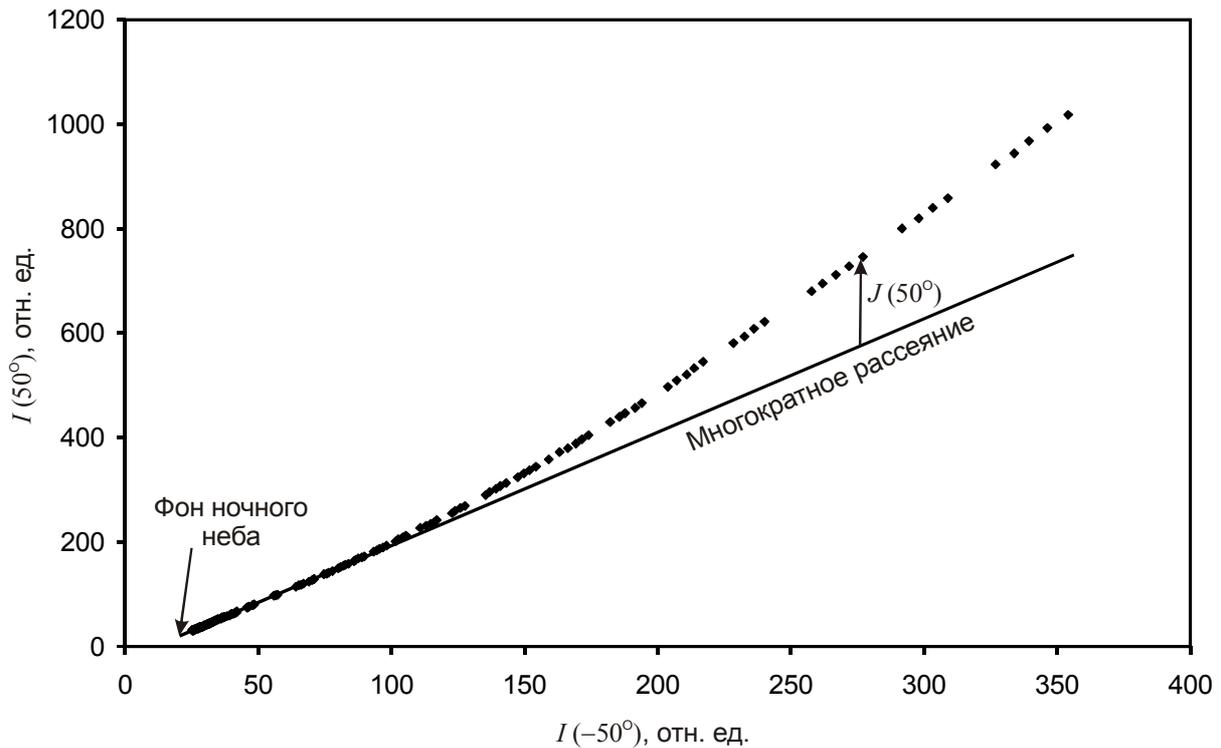


Рисунок 4. Сравнение интенсивностей фона неба в симметричных точках солнечного вертикала (вечерние сумерки 31.V).

Постоянное отношение интенсивностей в симметричных точках солнечного вертикала – свойство многократного рассеяния, отмеченное в [6, стр.198, 12, стр.59]. Оно также очевидно из рисунка 4, где величины интенсивности сравниваются между собой. Многократное рассеяние доминирует на обоих зенитных расстояниях z и $-z$ ($z=50^\circ$ для рисунка), когда зенитное расстояние Солнца больше 100° , соответствующие точки располагаются вдоль прямой линии, также показанной на рисунке. Когда зенитное расстояние Солнца несколько меньше, интенсивность $I(-z, z_0)$ по-прежнему определяется многократным рассеянием, а в области зари (величина $I(z, z_0)$) появляется вклад однократного рассеяния $J(z, z_0)$. Соответствующие точки отклоняются от прямой на рисунке 4, что позволяет определить интенсивность однократно рассеянной компоненты $J(z, z_0)$. Это возможно делать, пока однократное рассеяние не станет заметным и в точке с зенитным расстоянием $-z$. Соответствующие границы будут определены далее. В ряде работ (например [12, стр.59]) процедура распространяется и на меньшие значения зенитных расстояний Солнца с учетом линейной зависимости логарифма интенсивности многократного рассеяния от зенитного расстояния Солнца, однако подобная экстраполяция приводит к существенным погрешностям результатов [7, стр.169]. Необходимо отметить, что сравнение интенсивностей проводится только для точек, симметричных относительно зенита, и возможные радиальные искажения, связанные с плоским полем камеры или объектива «рыбий глаз», не влияют на результат.

На рисунке 5 показана зависимость поляризации фона неба P_0 от зенитного расстояния Солнца для зенита и точек солнечного вертикала с зенитным расстоянием $\pm 50^\circ$. Данные соответствуют вечерним сумеркам 1.VI. Под поляризацией подразумевается отношение компонент вектора Стокса I_2/I_1 , положительное при направлении поляризации перпендикулярно плоскости рассеяния (плоскости солнечного вертикала) и отрицательное – при параллельном направлении (третья компонента вектора Стокса I_3 на солнечном вертикале близка к нулю). На кривой, соответствующей зениту, прослеживаются все этапы сумерек, описанные в [10, стр.1459], и соответствующие изменения поляризации, но с некоторым отличием пограничных значений зенитного расстояния Солнца. Ранние сумерки

соответствуют значениям z_0 , меньшим 93° . Поляризация в это время усиливается с погружением Солнца вследствие входа тропосферного аэрозоля в земную тень. Светлые сумерки (z_0 от 93° до 95°) характеризуются максимальным значением поляризации и практически постоянным отношением вкладов однократного и многократного рассеяния. Уменьшение вклада однократного рассеяния в переходные сумерки (z_0 от 95° до 99°) приводит к ослаблению поляризации. В темные сумерки (z_0 от 99° до 100°) многократное рассеяние в зените становится полностью доминирующим, ослабление поляризации несколько замедляется, однако далее вновь возобновляется за счет проявляющегося вклада фона ночного неба (стадия перехода сумерек в ночь).

Ситуация несколько отличается вдали от зенита, при z , равном $\pm 50^\circ$. В светлую стадию сумерек поляризация увеличивается в области зари и уменьшается практически с той же скоростью в противоположной части неба. Причина этого состоит в движении точки с максимальной поляризацией однократного рассеяния (располагающейся под углом около 90° от Солнца). Данный эффект стал основой метода разделения однократного и многократного рассеяния [7, стр.160, 8, стр.243] в этот период сумерек. Далее поляризация уменьшается вследствие все большего доминирования многократного рассеяния. Стадия темных сумерек наступает при существенно разных зенитных расстояниях Солнца: 97.5° для $z = -50^\circ$ и 100° для $z = 50^\circ$ (эти моменты показаны стрелками на рисунке 5). Это и есть границы интервала, где однократное рассеяние при $z = 50^\circ$ может быть выделено методом, описываемым в настоящей работе (хорошая точность достигается при $z_0 < 99.3^\circ$). Та же процедура может проводиться для других z , но с иными пограничными значениями зенитного расстояния Солнца.

Поляризация фона неба в темные сумерки для зенитных расстояний точки наблюдения $\pm 50^\circ$ практически постоянна и одинакова, это характерное свойство многократного рассеяния [7, стр.170]. Однако, небольшие различия и изменения с погружением Солнца все же заметны. Они связаны с фоном ночного неба и его собственной поляризацией, усиленной засветкой от Москвы на севере. Этот эффект учитывается в процедуре выделения однократного рассеяния, описываемой далее.

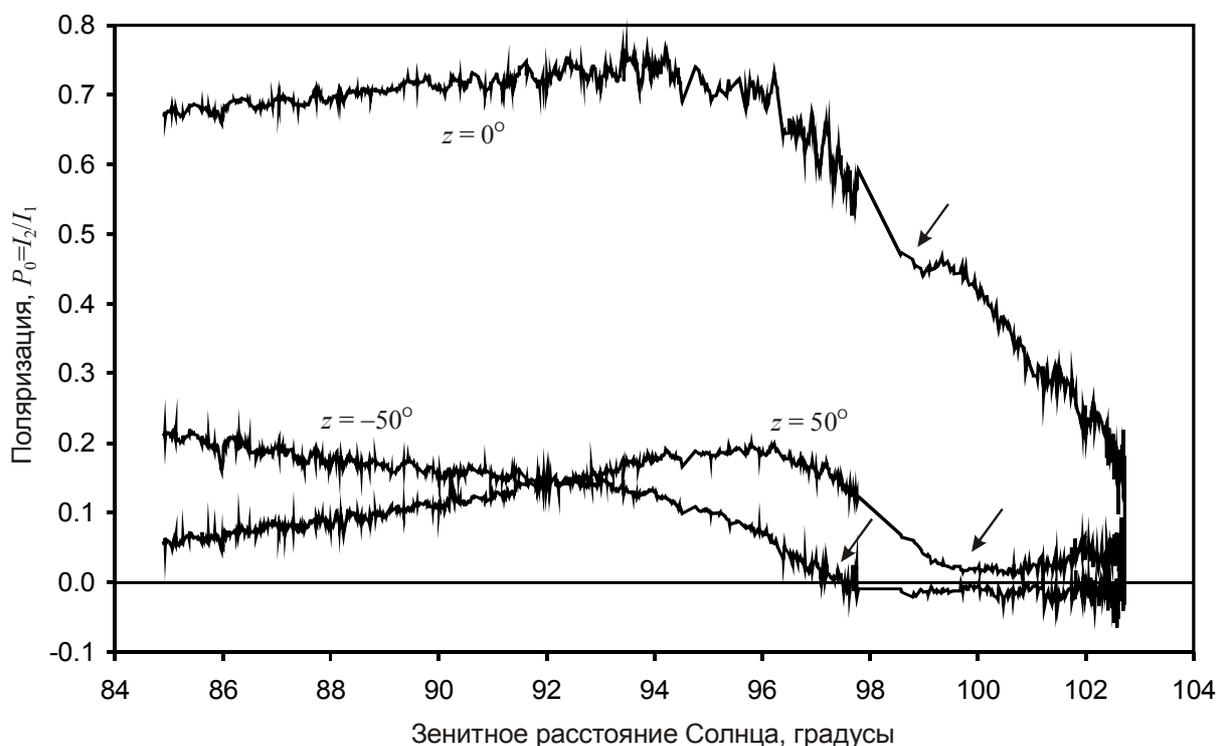


Рисунок 5. Поляризация фона сумеречного неба в зависимости от зенитного расстояния Солнца (вечерние сумерки 1.VI). Стрелки указывают начало периода темных сумерек.

3. Выделение однократного рассеяния.

Интенсивность фона сумеречного неба $I(z, z_0)$ является суммой компонент однократного и многократного рассеяния $J(z, z_0)$ и $j(z, z_0)$, а также фона ночного неба $n(z)$. Однократное рассеяние заметно, если зенитное расстояние Солнца z_0 не превосходит некоторого предельного значения $z_{0S}(z)$. Рассмотрим симметричные точки солнечного вертикала с зенитными расстояниями z и $-z$ и интервал зенитных расстояний Солнца:

$$z_{0S}(-z) < z_0 < z_{0S}(z). \quad (1)$$

Значения интенсивности фона сумеречного неба составляют:

$$\begin{aligned} I(z, z_0) &= J(z, z_0) + j(z, z_0) + n(z); \\ I(-z, z_0) &= j(-z, z_0) + n(-z). \end{aligned} \quad (2)$$

На основе данных соседнего интервала с $z_0 > z_{0S}(z)$, для которого $J=0$, можно записать:

$$j(z, z_0) + n(z) = A(z) + B(z) \cdot (j(-z, z_0) + n(-z)). \quad (3)$$

Это соотношение показано прямой линией на рисунке 4. Коэффициенты A и B не зависят от z_0 , и данное уравнение может быть переписано как

$$\begin{aligned} j(z, z_0) &= B(z) \cdot j(-z, z_0); \\ n(z) &= A(z) + B(z) \cdot n(-z). \end{aligned} \quad (4)$$

Вычисляя коэффициенты A и B из диаграммы на рисунке 4, подставляем их в уравнения (2-3) и получаем выражение для интенсивности однократного рассеяния:

$$J(z, z_0) = I(z, z_0) - A(z) - B(z) \cdot I(-z, z_0). \quad (5)$$

Необходимо отметить, что солнечное затмение 1.VI произошло во время темных сумерек, когда величина J во всей наблюдаемой части солнечного вертикала была равна нулю, а интенсивность многократного рассеяния уменьшилась там в равной степени во всех точках, не влияя тем самым на параметр B .

Величины поляризации многократного рассеяния (p) и фона ночного неба (q) считаются независимыми от z_0 [7, стр.173]. Для положительных значений z в период темных сумерек ($z_0 > z_{0S}(z)$) поляризация фона неба равна

$$p_D(z, z_0) = \frac{j(z, z_0)p(z) + n(z)q(z)}{j(z, z_0) + n(z)} = p(z) + \frac{(q(z) - p(z))n(z)}{I(z, z_0)} = p(z) + \frac{C(z)}{I(z, z_0)}. \quad (6)$$

Значение $p_D(z, z_0)$ определяется многократным рассеянием и фоном ночного неба. Построив диаграмму величин поляризации (p_D) и обратной интенсивности ($1/I$) для $z_0 > z_{0S}(z)$, показанную на рисунке 6 для вечера 1.VI, мы определяем величины p и C . Если взять другой интервал величин z_0 , определяемый неравенством (1), интенсивность фона неба I уже не будет равна сумме j и n , а поляризация P_0 будет отличаться от p_D вследствие появления однократного рассеяния в области зари:

$$p_D(z, z_0) = p(z) + \frac{C(z)}{j(z, z_0) + n(z)} = p(z) + \frac{C(z)}{A(z) + B(z)I(-z, z_0)}; \quad (7)$$

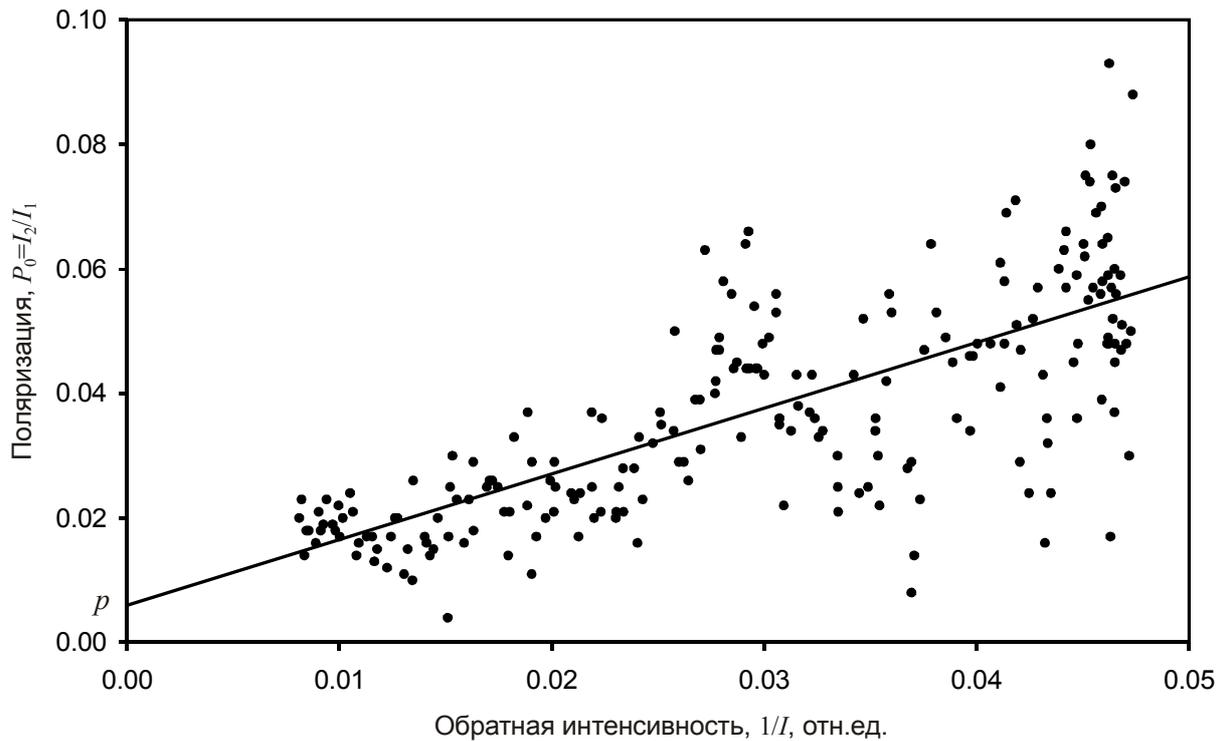


Рисунок 6. Корреляция обратной интенсивности и поляризации для темной стадии вечерних сумерек I.VI, $z = 50^\circ$.

$$\begin{aligned}
 P_0(z, z_0) &= \frac{J(z, z_0)P(z, z_0) + ((j(z, z_0) + n(z))p_D(z, z_0))}{J(z, z_0) + j(z, z_0) + n(z)} = \\
 &= \frac{J(z, z_0)P(z, z_0) + p(z)(A(z) + B(z)I(-z, z_0)) + C(z)}{I(z, z_0)}. \quad (8)
 \end{aligned}$$

В итоге, поляризация однократно рассеянной компоненты (нормализованная вторая компонента вектора Стокса) составляет

$$P(z, z_0) = \frac{I(z, z_0)P_0(z, z_0) - p(z)(A(z) + B(z)I(-z, z_0)) - C(z)}{J(z, z_0)}. \quad (9)$$

Формулы (5) и (9) дают искомые значения интенсивности и поляризации однократного рассеяния.

4. Результаты и заключение.

На рисунке 7 показаны зависимости поляризации однократного рассеяния $P(z_0)$ для двух значений z (40° и 50°) от величины эффективной высоты однократного рассеяния $h(z, z_0)$. Для сравнения на рисунке показаны линии, соответствующие молекулярному (релеевскому) рассеянию с параметром деполяризации 0.06. Поляризация молекулярного рассеяния медленно меняется за счет увеличения угла рассеяния, равного $(z_0 - z)$. Наблюдаемая картина характерна для невозмущенной мезосферы – поляризация не претерпевает сильных изменений, лишь слегка уменьшаясь на высотах более 75 км, все время оставаясь несколько меньшей, чем для случая молекулярного рассеяния. Учитывая, что поляризация аэрозольного рассеяния при указанных углах существенно меньше, чем для молекулярного рассеяния, мы можем оценить интенсивность аэрозольного рассеяния как 20-30% от интенсивности молекулярного рассеяния с медленным ростом данного вклада с высотой. Это вполне согласуется с данными космических ультрафиолетовых наблюдений [13, стр.1417].

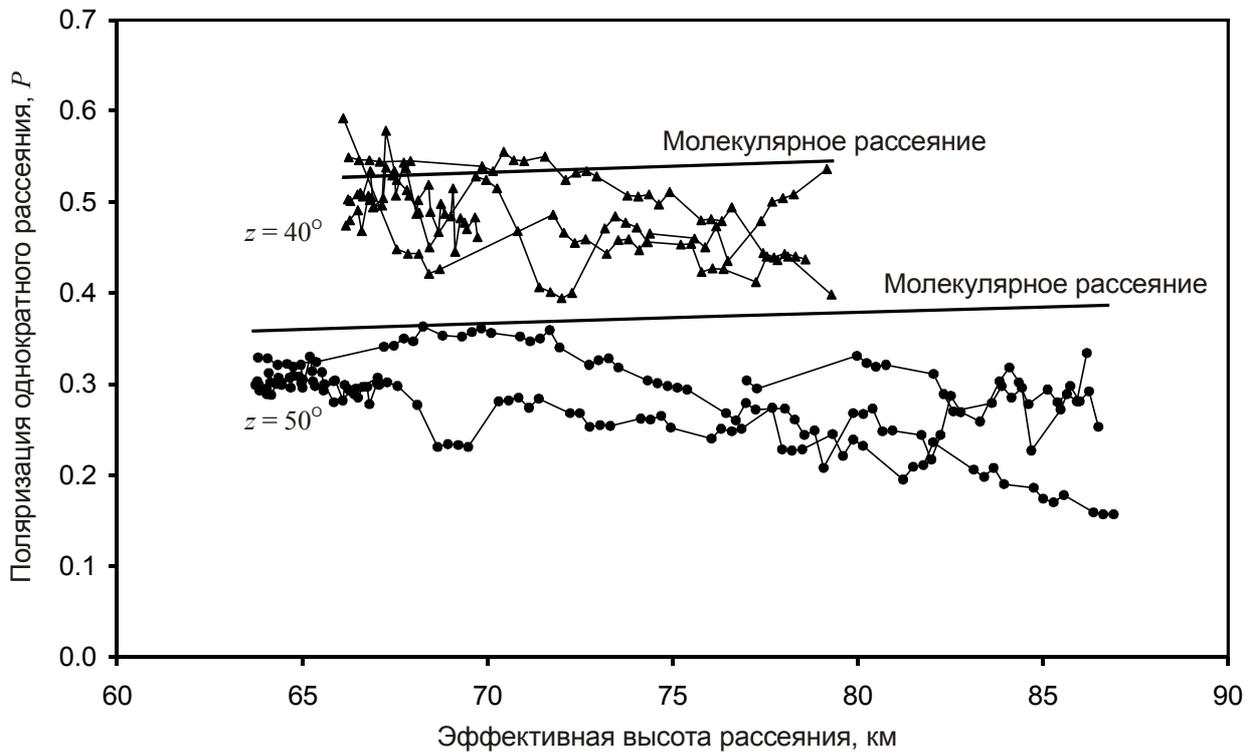


Рисунок 7. Высота́ная зависимость поляризации однократного рассеяния для зенитных расстояний 40° и 50° в сравнении со значениями для молекулярного рассеяния.

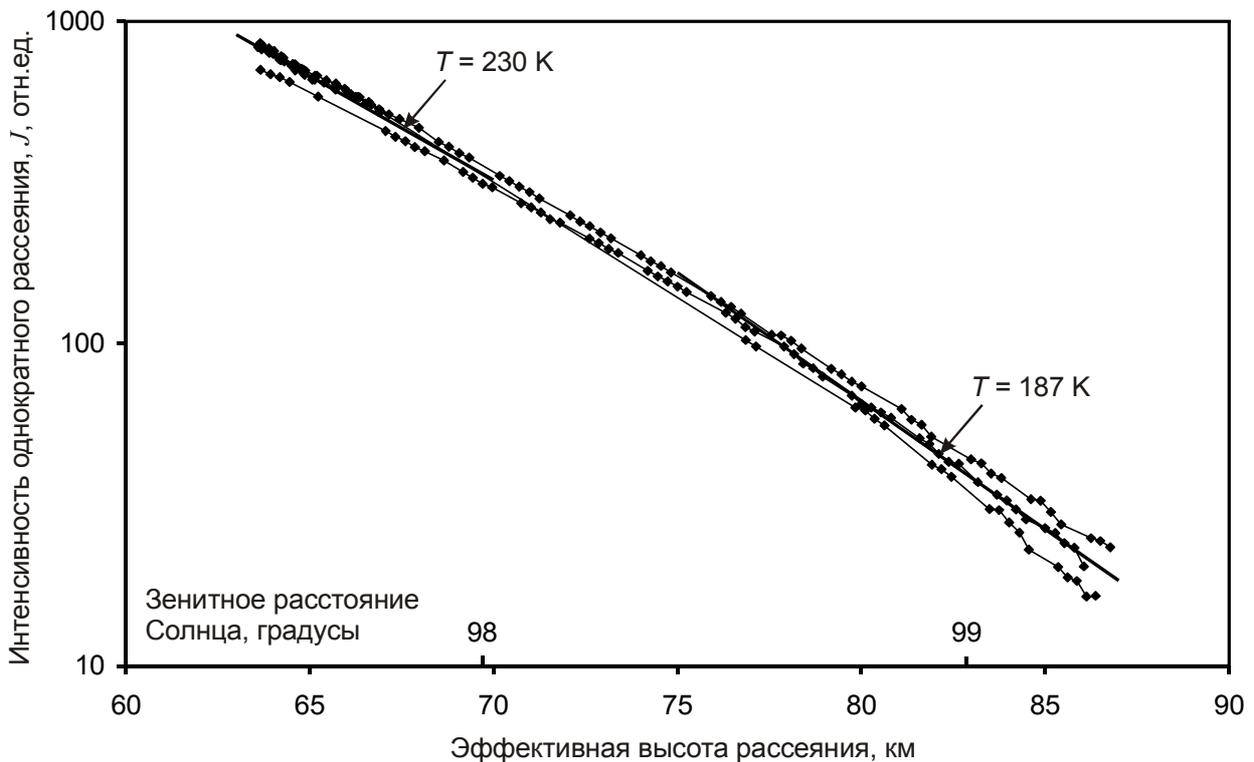


Рисунок 8. Высота́ная зависимость интенсивности однократного рассеяния, зенитное расстояние 50° .

Зависимости интенсивности однократного рассеяния $J(z_0)$ от эффективной высоты рассеяния показаны на рисунке 8 для зенитного расстояния 50° . Соответствующие значения зенитного расстояния Солнца z_0 также приведены вдоль оси абсцисс. Для переходной и темной стадии

сумерек ($z_0 > 95^\circ$) однократное рассеяние происходит над плотными слоями атмосферы, и оптическая толщина на пути «сумеречного луча» до и после рассеяния не зависит от z_0 . Интенсивность пропорциональна коэффициенту рассеяния на эффективной высоте под углом рассеяния ($z_0 - z$). Этот угол, а также вклад аэрозольного рассеяния меняются мало, поэтому величину $J(z_0)$ в фиксированной точке неба можно считать пропорциональной плотности атмосферы на высоте $h(z_0)$. На рисунке 8 видно, что это соответствует действительности, зависимости логарифма интенсивности от высоты близки к линейным. Величины температуры, оцененные из этих зависимостей (в том числе температуры мезопаузы) типичны для раннего лета средних широт. Таким образом, температура мезосферы может также измеряться на основе измерений фона сумеречного неба при условии невозмущенного состояния мезосферы. Точность этих измерений может быть улучшена в случае учета рефракции в модели «сумеречного луча». Для исследования аэрозольного рассеяния последнее обстоятельство не играет особой роли.

Точность измерений интенсивности и поляризации однократного рассеяния представляется достаточной не только для обнаружения, но и количественного исследования аэрозольных слоев в атмосфере и их временной эволюции. Это может иметь место после максимумов крупных метеорных потоков, когда в мезосфере осаждается большое количество метеорной пыли. Изменения поляризации в это время регистрируется даже в зените [10, стр.1462]. Повышенный уровень рассеяния света в области зари может наблюдаться при большем зенитном расстоянии Солнца z_0 (для той же высоте рассеяния $h(z, z_0)$) на более темном фоне многократного рассеяния. Подобные наблюдения особенно интересны для лета средних широт, когда существенное охлаждение мезосферы может приводить к появлению серебристых облаков, а длительность сумерек и максимальное значение z_0 оптимальны для этих измерений.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, грант №12-05-00501.

Список литературы

1. Фесенков В.Г. О строении атмосферы (фотометрический анализ сумерек) // Труды Главной российской астрофизической обсерватории. 1923. Т.2. Стр.7-23.
2. Link F., Robley R. Meteoric contamination of the upper atmosphere by the Quadrantid Shower // Planetary and Space Science. 1971. V.19. P.1585-1587.
3. Розенберг Г.В. Сумерки. Москва, Изд-во физ.-мат. лит-ры. 1963, 380 стр.
4. Hulburt E.O. Explanation of the Brightness and Color of the Sky, Particularly the Twilight Sky // Journal of Optical Society of America. 1953. V.43. P.113-118.
5. Postlyakov O.V. Linearized vector radiative transfer model MCC++ for a spherical atmosphere. // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2004. V.88. P.297-303.
6. Фесенков В.Г. О поляризационном методе исследования сумеречных явлений // Астрон. журн. 1966. Т.43. Стр.198-205.
7. Угольников О.С. Фотометрия и поляриметрия сумеречного неба. Проблема многократного рассеяния света в период сумерек // Космические исследования. 1999. Т.37. № 2. Стр.168-175.
8. Угольников О.С., Маслов И.А. Многоцветная поляриметрия сумеречного неба. Роль многократного рассеяния света как функция длины волны // Космические исследования. 2002. Т.40. №3. Стр.242-251.
9. Ugolnikov O.S., Postlyakov O.V., Maslov I.A. Effects of multiple scattering and atmospheric aerosol on the polarization of the twilight sky // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2004. V.88. P.233-241.
10. Ugolnikov O.S., Maslov I.A. Detection of Leonids meteoric dust in the upper atmosphere by polarization measurements of the twilight sky // Planetary and Space Science. 2007. V.55. P.1456-1463.

11. Ugolnikov O.S., Maslov I.A. Исследования стратосферного аэрозольного слоя на основе поляризационных измерений сумеречного неба. // Космические исследования. 2009. Т.47. №3. Стр.198-207.
12. Zaginailo Yu.I. Determination of the second twilight brightness by the method of the twilight probing of the Earth's atmosphere. // Odessa Astronomical Publication. 1993. V.6. P.59-67.
13. Черемисин А.А., Границкий Л.В., Мясников В.М., Ветчинкин Н.В., Слабко В.В. Дистанционное зондирование в ультрафиолетовом диапазоне вертикального распределения аэрозоля и озона в верхней атмосфере с борта астрофизической станции «Астрон» // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т.10. №12. Стр.1415-1423.