

ФУНКЦИЯ РАССЕЙЯНИЯ ТРОПОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ПО ДАННЫМ ПОЛЯРИМЕТРИИ ФОНА СУМЕРЕЧНОГО И НОЧНОГО НЕБА

О.С. Угольников¹, И.А. Маслов^{1,2}

¹Институт космических исследований РАН, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, 119992, Москва, Университетский просп., 13

Поступила в редакцию 29.03.2010

В работе проводится фотометрический и поляризационный анализ фона неба вблизи зенита в сумеречный и ночной период в разные годы и сезоны. Отмечается период повышенного содержания тропосферного аэрозоля летом 2009 года. Аэрозольное рассеяние излучения Солнца выделяется из общего фона сумеречного неба, аэрозольное рассеяние излучения Луны – из общего фона ночного неба. Результаты сравниваются с данными относительно чистой зимней тропосферы 2006 года. На основе наблюдательных данных строится поляризационная функция рассеяния на частицах тропосферного аэрозоля в ночной период.

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерения поля рассеянного излучения являются эффективным средством исследований микрофизических свойств рассеивающей среды. Особенно ценны измерения, сделанные в широком диапазоне углов рассеяния, что позволяет построить функцию (или индикатрису) рассеяния атмосферной среды или ее какой-либо отдельной фракции в этом угловом диапазоне. Эффективность измерений еще более возрастает, если наряду с интенсивностью излучения определяется и его поляризация. Тогда уже можно говорить о векторных измерениях с целью вычисления разных компонент матрицы рассеяния.

В последнее время подобные исследования часто проводятся при помощи искусственного источника излучения, например, лазера – в этом состоит идея лидарных измерений. Но своей значимости не теряют измерения фона рассеяния естественных источников, прежде всего – Солнца. Они особенно актуальны для построения функций рассеяния в широком диапазоне углов. Измерения фона дневного неба использовались для изучения оптических свойств нижней атмосферы уже достаточно давно [1].

В то же время, измерения поля рассеянного солнечного излучения можно проводить только днем. Длительные измерения при различных условиях освещения Солнцем осуществимы лишь в летний период. Возможности изучения зимней атмосферы заметно сужаются, а ночная атмосфера оказывается для подобных измерений недоступной.

С этой точки зрения эффективными могут оказаться измерения фона ночного неба при значительной фазе Луны. При этом необходимо учитывать, что рассеянный лунный свет является основной, но не единственной составляющей фона ночного неба, а остальные компоненты (собственное свечение атмосферы, зодиакальный свет, слабые звезды) вносят заметный вклад не только в яркость фона ночного неба, но и в его поляризацию [2]. Кроме этого, световой поток от Луны в сильной степени зависит от ее фазы и заметно изменяется даже в пределах одной наблюдательной ночи. Чтобы использовать Луну как стандартный источник света, изменение ее интегральной яркости должно быть надежно известно. Особенно эффективными представляются многодневные серии наблюдений при стабильной ясной погоде и переменной фазе Луны, включая безлунные периоды ночи. Для выполнения подобной работы необходима значительная чувствительность и точность приемной аппаратуры, особенно если предполагаются поляризационные измерения фона ночного неба.

Наконец, кроме дня и ночи, существует еще и пограничный период, эффективный для исследования не только приземного, но и других слоев атмосферы – сумерки. Геометрия распространения излучения в атмосфере дает возможность проводить разделение по высотам в зависимости от периода сумерек и спектральной области, в которой проводятся наблюдения [3]. Обширный анализ основ метода сумеречного зондирования приведены в [4]. Особенно эффективными являются поляризационные измерения фона сумеречного неба, которые позволяют выявлять появление тропосферного [5], стратосферного [6] и мезосферного [7] аэрозоля. Основная сложность метода связана со значительным вкладом многократного рассеяния. Для его определения также можно использовать поляризационные данные [8-9]. В дневной период (или ночью при достаточной большой фазе и высоте Луны над горизонтом) вклад многократного рассеяния несколько уменьшается, но остается заметным.

Чтобы получить информацию о функции рассеяния атмосферной среды или ее отдельного оптического компонента в широком диапазоне углов, необходимо либо проводить наблюдения на обширном участке неба, либо охватывать периоды с различным положением источника (Солнца или Луны) на небе. В обоих случаях необходимо принимать во внимание изменения геометрии распространения излучения сквозь атмосферу.

Целью настоящей работы является построение функции рассеяния элемента приземной атмосферы и, в частности, тропосферного аэрозоля, на основе взаимно дополняющих данных сумеречных и ночных поляризационных измерений фона неба вблизи зенита. При сумеречном анализе акцент делается на утренние сумерки, когда состояние атмосферы более схоже с ночным. «Связка» результатов обеих процедур производится при зенитном расстоянии Солнца (сумеречное небо) и Луны (ночное небо) в 88° , пограничном между дневными и сумеречными условиями освещения атмосферы.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Схема поляризационных измерений фона неба вблизи зенита аналогична используемой в [5-7], не претерпев существенных изменений. Сигнал от фона неба регистрируется камерой с полем зрения чуть более $8^\circ \times 6^\circ$, направленной в зенит и оснащенной вращающимся поляризационным фильтром. Спектральный фильтр вырезает область с эффективной длиной волны 5250 ангстрем, поляризационный фильтр в этой области имеет практически идеальные характеристики. Эта же спектральная область использовалась в работах [5-7] (в [5] – наряду с еще одной). Измерения начинаются на зенитном расстоянии Солнца около $87-88^\circ$ и продолжаются в течение вечерних (утренних) сумерек и ночи. Камера оснащена ПЗС-матрицей SBIG ST-6, время экспозиции в зависимости от периода наблюдений изменяется от 0.01 с до 20-24 с.

В темные сумерки и ночью изображения звезд на каждом отдельном кадре используется для корректировки параметров ориентации камеры. Калибровка по звездам в поле зрения позволяет отслеживать изменения вертикальной оптической толщины атмосферы. Далее на кадре маскируются изображения звезд до 12^m на основе каталога Tycho 2 с пересчетом на равноденствие даты. Полученные кадры используются для определения интенсивности и поляризации фона неба в зените, а также производных этих величин в различных направлениях. Процедура аналогична используемой при исследованиях фона безлунного ночного неба в [2].

Наблюдения проводились в Крымской Лаборатории Государственного Астрономического института им. П.К. Штернберга (п. Научный, Крым, Украина). Основной наблюдательный материал для настоящей работы получен в течение летнего периода устойчивой ясной погоды 2-12.VIII.2009 г. Этот период содержит момент полнолуния (6.VIII, с небольшим полутеневым лунным затмением), а ближе к его завершению Луна, еще имеющая значительную фазу, поднималась в пункте наблюдения в ночной период на большую высоту над горизонтом, тем самым уменьшая величину угла рассеяния света при наблюдении вблизи зенита. В качестве сравнения используются результаты измерений в другие периоды, в частности, зимние данные 7-10.XII.2006 г., также со значительной фазой Луны и ее большой

высотой над горизонтом. Этот период был подробно описан в [6] и характеризовался появлением стратосферного аэрозоля, возможно связанного с извержением вулкана Рабаул в октябре 2006 г. В то же время тропосфера была сравнительно чистой, типичной для зимнего периода ясной погоды.

3. АНАЛИЗ ФОНА СУМЕРЕЧНОГО НЕБА

Выделение фракции аэрозольного рассеяния в период сумерек может эффективно производиться на основе поляризационных измерений [5-7]. Увеличение содержания аэрозоля в том или ином слое атмосферы сопровождается уменьшением поляризации фона неба в тот период сумерек, когда эффективное однократное рассеяние происходит в указанном слое. Очевидно, что чем выше слой, тем в более темный период сумерек он себя проявляет. Если говорить о тропосферном аэрозоле, то он освещается прямыми солнечными лучами только в светлые сумерки. Деполяризация сумеречного фона неба, обусловленная рассеянием на тропосферном аэрозоле, обычно хорошо заметна только в длинноволновой области, где горизонтальные солнечные лучи не подвергаются сильному ослаблению в атмосфере [5]. На длине волны 5250 ангстрем этот эффект в сумерки обычно невелик и проявляется лишь с восходом Солнца.

В августе 2009 года сложилась иная ситуация – деполяризационный эффект на длине волны 5250 ангстрем в период светлых сумерек был существенным. Это заметно на рисунке 1, где приведены зависимости поляризации фона неба в зените p от зенитного расстояния Солнца ζ_0 для ряда утренних сумерек августа 2009 года. Для сравнения приводятся аналогичные кривые для другого лета (июль 2007 г.) и для зимы (декабрь 2006 г.). Деполяризационный эффект менялся от сумерек к сумеркам и сопровождался также изменением других оптических характеристик фона неба (градиентов яркости и поляризации вдоль солнечного вертикала). Связь всех эффектов с тропосферным аэрозолем рассматривалась в работе [5], там же был разработан метод определения вклада и поляризации однократного аэрозольного рассеяния. Применение этого метода к утренним сумеркам августа 2009 г. дает результаты, приведенные в правой колонке таблицы 1.

Значение поляризации аэрозольного рассеяния под углом около $90^\circ p_A$ (18%) вполне соответствует различным моделям тропосферного аэрозоля. Точность определения этой величины достаточно хороша, по крайней мере, значительно лучше, чем для обеих спектральных полос в работе [5]. Это можно объяснить большим вкладом аэрозольного рассеяния. Данная точность вполне достаточна для проведения дальнейшего анализа.

Деполяризационный эффект прослеживается до зенитного расстояния Солнца в 93.6° , что больше, нежели в той же длине волны в другие сезоны [5]. Это зенитное расстояние соответствует высоте геометрической тени Земли в зените в 12.5 км, эффективное рассеяние света происходит еще на несколько километров выше. Можно сделать вывод, что аэрозоль заполняет всю тропосферу вплоть до тропопаузы, при этом сама тропопауза располагается достаточно высоко (широта точки наблюдения около $+45^\circ$, летний сезон).

Величина вклада аэрозольного рассеяния в фон сумеречного неба вблизи зенита существенно зависит от зенитного расстояния Солнца. Для ее определения в соответствии с [5] вводится величина поляризации «чистого» фона неба, свободного от однократного аэрозольного рассеяния (но не от многократного рассеяния, в том числе на аэрозоле), p_0 . Эта величина мало меняется от сумерек к сумеркам и практически не зависит от зенитного расстояния Солнца (в период светлых сумерек, для ζ_0 от 88° до 94°). Значение этой величины также приведено в таблице 1. Вклад однократного аэрозольного рассеяния a_A тогда будет равен

$$a_A = \frac{p_0 - p}{p_0 - p_A}, \quad (1)$$

Параметр	XII.2006	VIII.2009
Поляризация аэрозольного рассеяния под углом 90° , p_A	0.28 ± 0.03	0.18 ± 0.06
Макс. зенитное расстояние Солнца, ζ_{0M} , $^\circ$	–	93.6 ± 0.4
Поляризация «чистого» фона неба, p_0	0.766 ± 0.006	0.671 ± 0.019
Вклад молекулярного рассеяния A_R , $\zeta_0=88^\circ$	0.626	0.472
Вклад аэрозольного рассеяния a_A , $\zeta_0=88^\circ$	0.025	0.259
Вклад многократного рассеяния a_M , $\zeta_0=88^\circ$	0.349	0.269
Вертикальная оптическая толщина атмосферы, τ_0	0.190	0.424

Таблица 1. Оптические параметры фона сумеречного неба и атмосферы в целом, усредненные по наблюдениям декабря 2006 г. и августа 2009 г.

где p – величина поляризации фона неба в зените в текущий момент. В таблице приведено значение a_A для зенитного расстояния Солнца в 88° , усредненное для 9 утренних сумерек августа 2009 г.

Величина p_0 , а также дифференциальные поляризационные характеристики «чистого» фона неба могут быть далее использованы для разделения этого фона на молекулярное и многократное рассеяние. Процедура подробно описана в работах [8-9], результирующее значение вклада однократного молекулярного рассеяния (обозначенное в этих работах A_T) нужно умножить на $(1 - a_A)$, чтобы учесть наличие аэрозольного рассеяния. Полученное значение вклада молекулярного рассеяния A_R также приведено в таблице 1. Отношение a_A/A_R есть отношение аэрозольного и молекулярного коэффициента рассеяния под углом 88° в слое рассеяния в тропосфере. Наконец, вклад многократного рассеяния a_M дополняет сумму A_R и a_A до единицы.

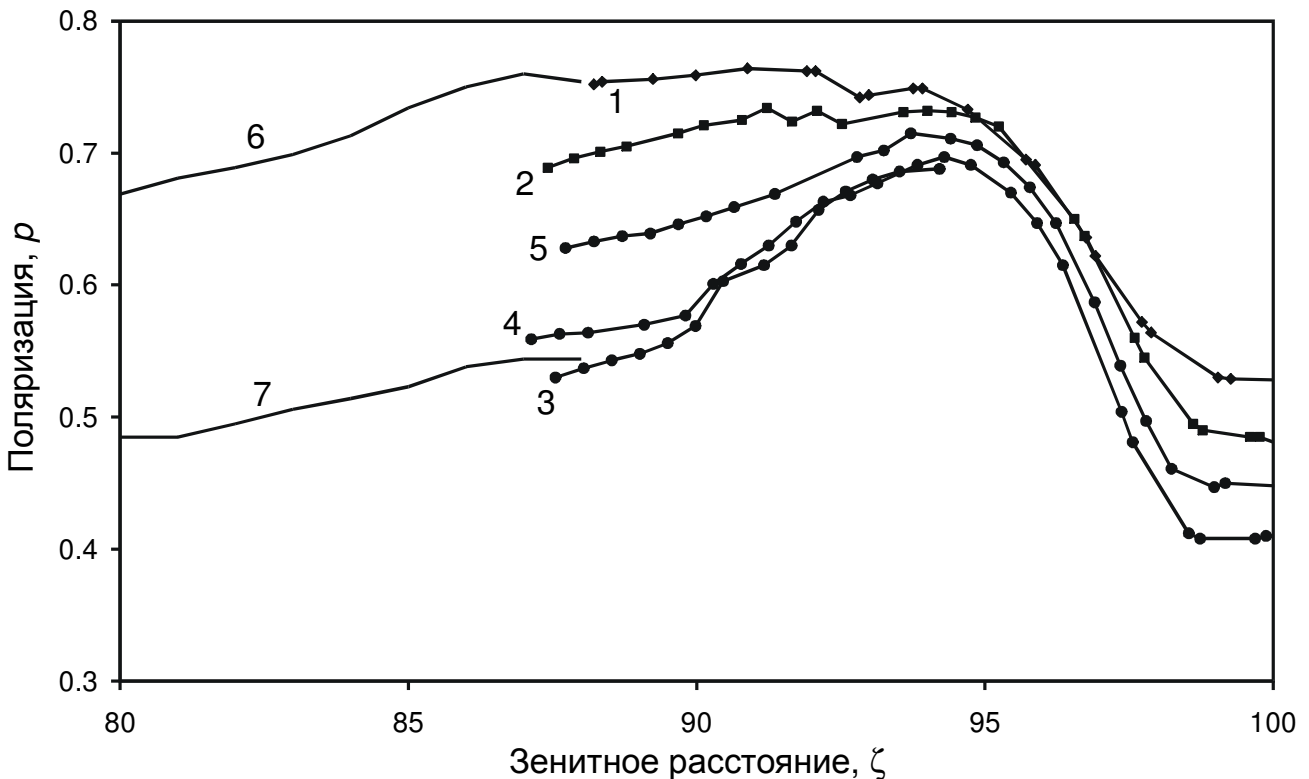


Рисунок 1. Зависимости поляризации фона неба в зените от зенитного расстояния источника (1 – вечерние сумерки 08.XII.2006, 2 – утренние сумерки 02.VII.2007, 3 – утренние сумерки 02.VIII.2009, 4 – утренние сумерки 03.VIII.2009, 5 – утренние сумерки 04.VIII.2009, 6 – усреднение по лунным ночам, XII.2006, 7 – усреднение по лунным ночам, VIII.2009).

Похожий анализ проводится для серии наблюдений сумерек в декабре 2006 года. Разница состоит в том, что однократное рассеяние на тропосферном аэрозоле фактически не сказывается на поляризации фона неба в зените в аналогичный период сумерек. Причина состоит в меньшем содержании аэрозоля в тропосфере, особенно в ее верхней части, где происходит рассеяние. С другой стороны, еще остается заметным рассеяние на стратосферном аэрозоле, отмеченное в работе [6]. Этот фактор приводит к уменьшению поляризации в более темный период сумерек, при зенитных расстояниях Солнца 90° - 95° , заметное на соответствующей кривой на рисунке 1. При зенитном расстоянии Солнца в 88° общий вклад аэрозольного рассеяния достаточно мал. Значение его поляризации, а также поляризации «чистого» фона неба получаются на основе процедуры учета стратосферного аэрозольного рассеяния, описанной в [6].

Полученные значения для зенитного расстояния Солнца 88° (при наблюдении в зените этот угол совпадает с углом однократного рассеяния) являются, по сути, граничными условиями для построения функции рассеяния под меньшими углами на основе измерений фона ночного неба, засвеченного Луной.

4. АНАЛИЗ ФОНА НОЧНОГО НЕБА

Яркость и поляризация фона ночного неба (зенитное расстояние Солнца более 108°) вблизи зенита измерялась в те же даты, что и соответствующие характеристики для сумеречного неба. Часть наблюдательного времени попадала на безлунные периоды (такowymi считались отрезки с зенитным расстоянием Луны $\zeta > 94^\circ$, при меньших значениях рассеяние лунного света еще заметно на фоне ночного неба). Измерения в эти периоды (после обработки, описанной в части 2 настоящей работы) использовались для оценки яркости и поляризации фона безлунного неба в зависимости от координат текущего зенита и положения Солнца. Состав фона безлунного ночного неба в том же пункте наблюдений и спектральной полосе исследовался в [2]. Одна из компонент фона – зодиакальный свет – обладает заметной поляризацией. Это особенно относится к летним ночам, когда угловое расстояние зенита от Солнца ненамного превышает 90° .

Полученные значения компонент вектора Стокса фона безлунного неба вычитались из общего фона неба, когда Луна располагалась над горизонтом. Таким образом, выделялась компонента ночного неба, связанная с рассеянием лунного света. Ее яркость, как правило, существенно превышала яркость безлунного неба, что существенно облегчало задачу. Полученное поле рассеянного излучения похоже на фон дневного неба при зенитном расстоянии Солнца, равном текущему зенитному расстоянию Луны.

В дальнейшем картина рассматривается в системе координат, в которой главная ось Oz направлена от зенита к положению Луны. Введем величину z , равную по модулю зенитному расстоянию проекции точки неба в кадре на эту ось. Эта величина будет положительной, если проекция находится с той же стороны от зенита, что и Луна, и отрицательной – с другой стороны. Для точек лунного вертикала со стороны Луны величина z есть просто зенитное расстояние. Вектор Стокса фона рассеяния лунного света в этой системе координат будет иметь две ненулевые компоненты, равные интенсивности излучения I и его произведения на поляризацию I_p . Из наблюдений мы получаем четыре величины: сами компоненты вектора Стокса и их производные по величине z .

Для каждого фиксированного зенитного расстояния Луны ζ мы имеем несколько измерений, сделанных при различных значениях фазового угла f , расстояния Луны r и, соответственно, интегральной яркости лунного диска $L(f,r)$. Величина яркости Луны как функция ее фазы и расстояния для близкой длины волны была получена в работе [10] на основе измерений [11]. Было также учтено небольшое уменьшение яркости лунного диска во время полутеневого затмения утром 6.VIII.2009. При стабильных атмосферных условиях интенсивность фона рассеянного лунного излучения при фиксированном зенитном расстоянии Луны ζ пропорциональна яркости L :

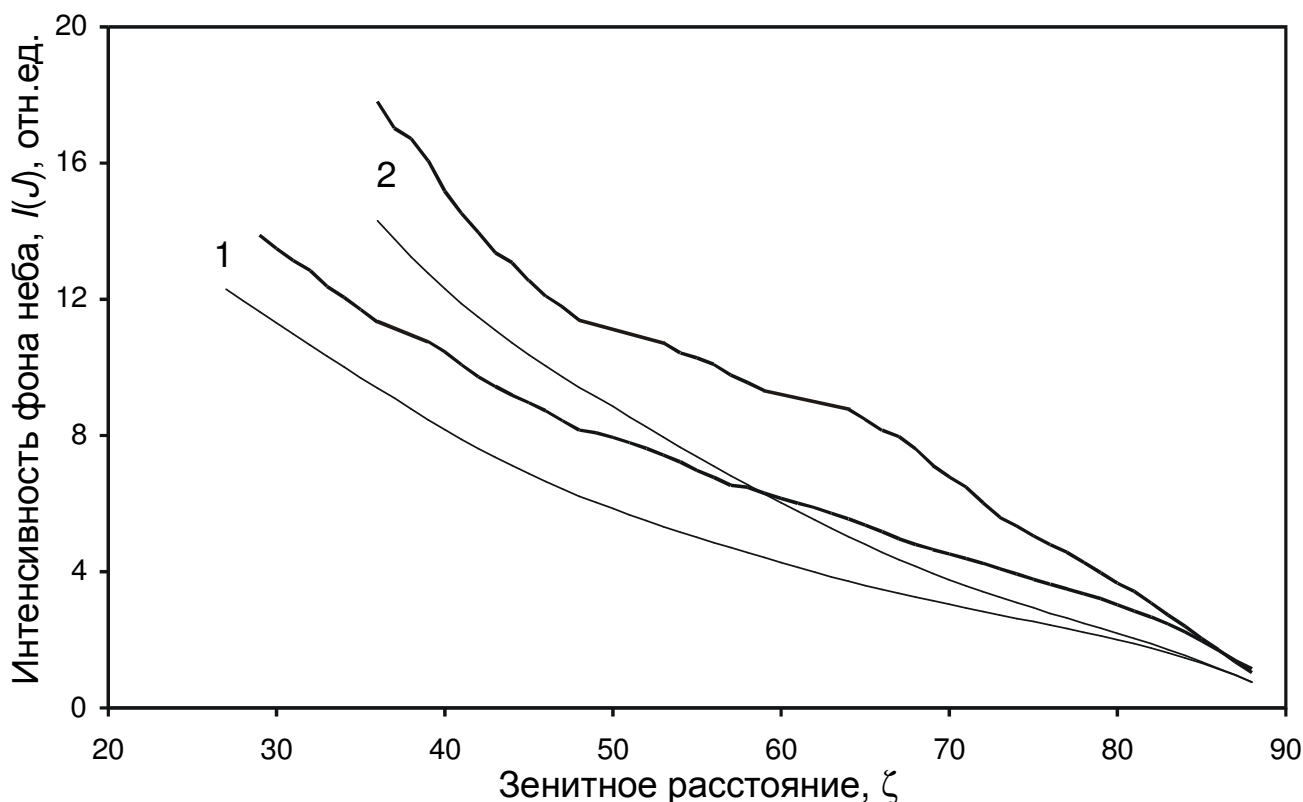


Рисунок 2. Полная интенсивность фона неба (жирные линии) и его однократно рассеянной компоненты при освещении «стандартной» полной Луной, в зависимости от ее зенитного расстояния (1 – усреднение по ночам XII.2006, 2 – усреднение по ночам VIII.2009).

$$i_1(\zeta, f, r) = \frac{I_1(\zeta)}{L_0} L(f, r). \quad (2)$$

Здесь L_0 – яркость «стандартной» полной Луны, расстояние до которой соответствует горизонтальному параллаксу в 1° , а I_1 – интенсивность (первая компонента вектора Стокса) фона неба, засвеченного «стандартной» Луной. Коэффициент пропорциональности определяется усреднением по всем имеющимся измерениям с весами, равными яркости Луны $L(f, r)$. Аналогично определяются другие три наблюдательных параметра: градиент интенсивности по лунному вертикалу dI_1/dz (ζ), вторая компонента вектора Стокса I_2 (ζ) и ее градиент dI_2/dz (ζ).

На рисунке 1 показаны зависимости поляризации фона рассеяния лунного света в декабре 2006 г. и августе 2009 г. для зенитных расстояний Луны, превышающих 80° . Эти зависимости дополняют аналогичные кривые для сумеречного неба. На рисунке 2 показаны зависимости $I_1(\zeta)$ для декабря 2006 г. и августа 2009 г. (жирные линии). Видно, что в летний период с большей запыленностью атмосферы интенсивность фона выше, нежели зимой, однако при зенитном расстоянии Луны около 85° обе величины практически сравниваются. Геометрия распространения излучения в это время становится схожей с сумеречной (с той разницей, что роль источника света исполняет Луна). В сумерки, как указывалось в [5], значение интенсивности фона неба в зените мало зависит от запыленности атмосферы, так как увеличение рассеивающей способности компенсируется существенным ослаблением света по его длинной траектории сквозь атмосферу.

5. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ

Для получения функции рассеяния построим простую модель формирования поля однократного рассеяния в условиях, аналогичных дневным (источник излучения находится над горизонтом). При зенитных расстояниях источника $\zeta < 70^\circ$ можно пользоваться плоскопараллельной моделью атмосферы. Рассмотрим распространение луча в оптической системе координат, в которой координата τ равна нулю на верхней границе атмосферы и τ_0 – у поверхности Земли. До точки рассеяния (координата τ) луч распространялся под углом ζ к нормали, а после нее – вертикально. Тогда мы можем записать выражение для интенсивности однократно рассеянного света (нормированную на яркость «стандартной» полной Луны):

$$J_1(\zeta) = \int_0^{\tau_0} e^{-\frac{\tau}{\cos \zeta}} S_{10}(\zeta) e^{-(\tau_0 - \tau)} d\tau. \quad (3)$$

Здесь $S_{10}(\zeta)$ – функция рассеяния среды, рассчитанная на единицу полной вертикальной оптической толщины. Более наглядной будет значение функции рассеяния на единицу молекулярной вертикальной оптической толщины $S_1(\zeta)$, так как эта оптическая толщина τ_R является практически неизменной для каждого конкретного пункта наблюдений и длины волны. Функции рассеяния связаны выражением

$$S_{10}(\zeta) = S_1(\zeta) \frac{\tau_R}{\tau_0}. \quad (4)$$

Делая эту подстановку, мы вычисляем значение интеграла в формуле (3):

$$J_1(\zeta) = S_1(\zeta) \tau_R \frac{e^{-\tau_0}}{(M-1)\tau_0} (1 - e^{-(M-1)\tau_0}) = S_1(\zeta) F(\zeta). \quad (5)$$

Здесь M – атмосферная масса, равная в модели плоской атмосферы $1/\cos \zeta$. Однако, мы будем рассматривать зенитные расстояния вплоть до 88° , где эта простая модель неприменима. В этом случае вполне можно использовать эмпирическую формулу Розенберга

$$M = (\cos \zeta + 0.025 \cdot e^{-11 \cos \zeta})^{-1}, \quad (6)$$

хорошо описывающую поведение величины M у горизонта [4]. Функция рассеяния $S_1(\zeta)$ разделяется на молекулярную и аэрозольную:

$$S_1(\zeta) = S_{1R}(\zeta) + S_{1A}(\zeta), \quad (7)$$

причем молекулярная функция рассеяния сохраняет практически неизменный во времени вид. Для угла ζ_S (88°) из сумеречных измерений мы имеем

$$\frac{S_{1A}(\zeta_S)}{S_{1R}(\zeta_S)} = \frac{a_A}{A_R}. \quad (8)$$

Интенсивность фона неба I_1 есть сумма интенсивностей однократного и многократного рассеяния, J_1 и j_1 . Обе величины достаточно сложным образом зависят от зенитного расстояния источника ζ . В то же время в дневных условиях (или в лунную ночь) характеристики многократного рассеяния имеют экстремум в зените, не обладая градиентами вдоль солнечного

(либо лунного) вертикала. Принимая это предположение, записываем выражение для градиента полной интенсивности:

$$\frac{dI_1}{dz}(\zeta) = \frac{dJ_1}{dz}(\zeta) = F(\zeta) \frac{dS_1}{dz} = -F(\zeta) \frac{dS_1}{d\zeta}. \quad (9)$$

Здесь было учтено, что функция F в дневных (лунных) условиях также не имеет градиентов по вертикалу, а аргументом функции S_1 является угол рассеяния, равный в точках лунного вертикала разности ζ и z . Соответственно, производные функции S_1 по этим углам различаются знаком. Интегрируя последнее уравнение, получаем:

$$S_1(\zeta) = S_1(\zeta_S) - \int_{\zeta_S}^{\zeta} \frac{dI_1}{dz}(\zeta) \frac{d\zeta}{F(\zeta)}. \quad (10)$$

Отметим, что в работе рассматриваются зенитные расстояния, меньшие ζ_S , и интегрирование происходит в обратную сторону. Для самого угла ζ_S мы знаем величину J_1 (а значит, и S_1) по данным сумеречных измерений. Интегрирование восстанавливает зависимости $S_1(\zeta)$ и $J_1(\zeta)$ во всем диапазоне, охваченном наблюдениями. Пользуясь известным выражением для молекулярной функции рассеяния

$$S_{1R}(\zeta) = S_{1R}(\pi/2) \cdot \frac{1 + 2\alpha + \cos^2 \zeta}{1 + 2\alpha} \quad (11)$$

и соотношениями (7) и (8), можно разделить функцию рассеяния на молекулярную и аэрозольную составляющие сначала для угла ζ , а затем и для всего рабочего диапазона углов. Здесь параметр α характеризует деполяризацию рассеяния света молекулами атмосферного воздуха и составляет около 0.03.

Описанная выше процедура может быть проведена, если содержание аэрозоля в атмосфере не слишком велико или не подвержено резким высотным изменениям. Эти условия выполнялись в декабре 2006 г. Поляризация фона неба оставалась достаточно высокой при ζ порядка 80° - 85° (рисунок 1), когда вся тропосфера уже хорошо освещена. При этом небольшие примеси аэрозоля наблюдались не только в тропосфере, но и в стратосфере. Невысокое значение вертикальной оптической толщины (0.19) также подтверждает данные суждения.

Однако, летом 2009 года ситуация представляется более сложной. Содержание аэрозоля в атмосфере достаточно велико, на что указывает значение вертикальной оптической толщины (около 0.42) и поляризационные характеристики фона неба. Значительная часть аэрозоля представляет собой пыль, располагающуюся в приземном слое атмосферы. Чтобы моделирование такой ситуации было более корректным, оптическая среда атмосферы разделяется на две компоненты. Первая (с оптической толщиной τ_1) связана с молекулярным рассеянием и аэрозолем, расположенным по всей тропосфере, и обладает свойствами, описанными выше. Вторая (с оптической толщиной $\tau_0 - \tau_1$) располагается вблизи поверхности Земли, ниже слоя эффективного рассеяния, и проявляет себя ослаблением излучения. В этом случае функция $F(\zeta)$ в уравнении (5) примет вид

$$F(\zeta) = \tau_R \frac{e^{-\tau_0}}{(M-1)\tau_1} (1 - e^{-(M-1)\tau_1}). \quad (12)$$

Критерием правильности выбора величины τ_1 является совпадение молекулярных функций рассеяния $S_{1R}(\zeta)$ в декабре 2006 г. и августе 2009 г. Проведенный анализ дает значение τ_1 , равное около 0.23, что составляет примерно половину полной оптической толщины в августе 2009 г.

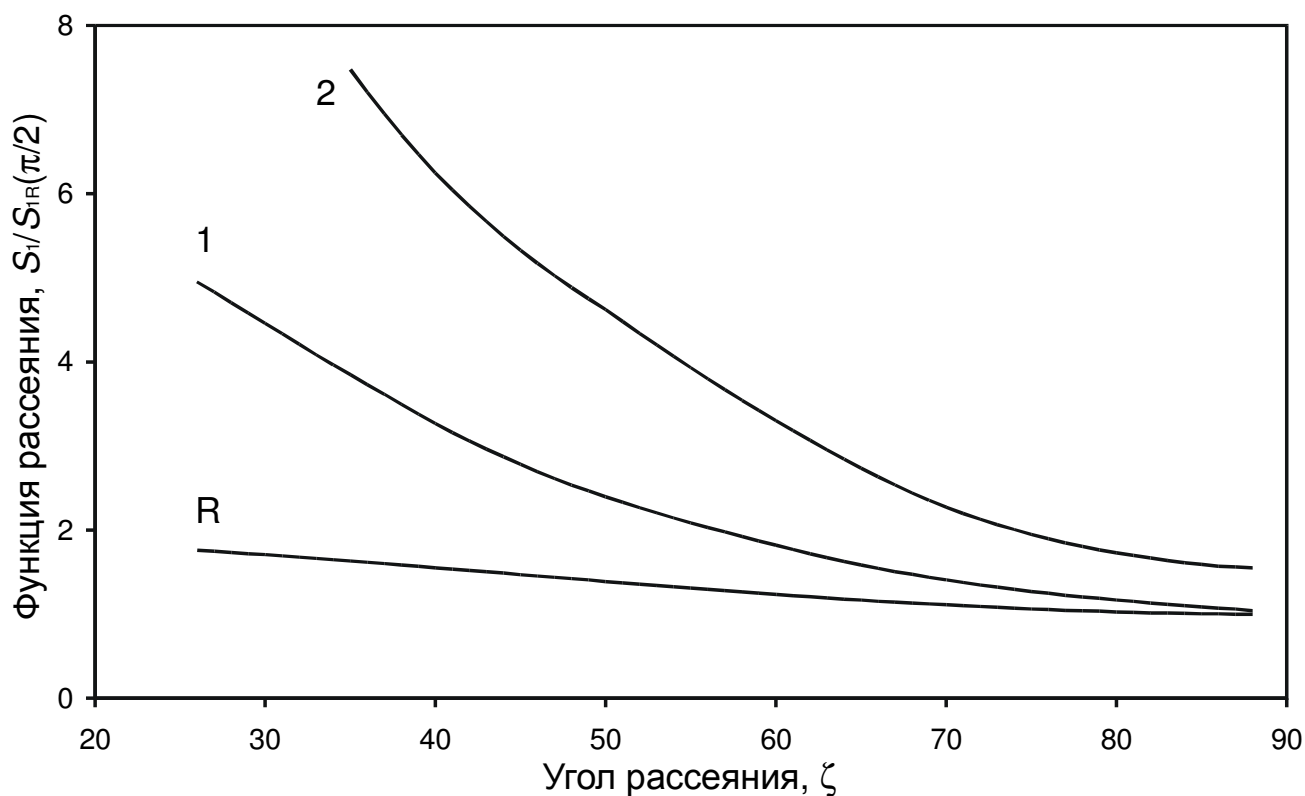


Рисунок 3. Функция рассеяния по измерениям фона ночного неба (1 – усреднение по ночам XII.2006, 2 – усреднение по ночам VIII.2009, R – молекулярная функция рассеяния).

На рисунке 3 показаны функции рассеяния $S_1(\zeta)$ для обоих сезонов. Также показана молекулярная функция рассеяния $S_{1R}(\zeta)$. Функции нормированы так, что молекулярная функция рассеяния для угла в 90° равна единице. По графикам можно судить о вкладе аэрозольного рассеяния при тех или иных значениях ζ . Функции рассеяния существенно возрастают при малых углах (особенно в летний период), что характерно для атмосферного аэрозоля. На рисунке 2 тонкими линиями показана зависимость интенсивности однократно рассеянного света от зенитного расстояния Луны. Видно, что его вклад в общую интенсивность фона постепенно увеличивается на малых ζ по сравнению с сумеречными условиями. Интенсивность многократного рассеяния в это время выходит на примерно постоянный уровень.

Летом 2009 г. результаты измерений при всех доступных углах рассеяния, вплоть до 88° , характеризуются, прежде всего, оптическим состоянием тропосферы. С учетом значительного вклада аэрозольного рассеяния уже в сумеречный период для этого сезона можно построить поляризационные характеристики рассеяния излучения на частицах аэрозоля в тропосфере. Для этого из второй компоненты вектора Стокса фона неба $I_2(\zeta)$ выделяется однократное рассеяние $J_2(\zeta)$, находится вторая компонента матрицы рассеяния $S_2(\zeta)$. Далее она разделяется на молекулярную и аэрозольную части $S_{2R}(\zeta)$ и $S_{2A}(\zeta)$. Указанная процедура идентична описанной выше для первой компоненты, учитывается высотный характер распределения аэрозоля (12), а граничное условие для угла 88° , аналогичное формуле (8), будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{S_{2A}(\zeta_S)}{S_{2R}(\zeta_S)} = \frac{a_A \cdot p_A(\zeta_S)}{A_R \cdot p_R(\zeta_S)}. \quad (13)$$

Значение поляризации тропосферного аэрозольного рассеяния p_A под углом ζ_S известно из сумеречных наблюдений и приведено в таблице 1.

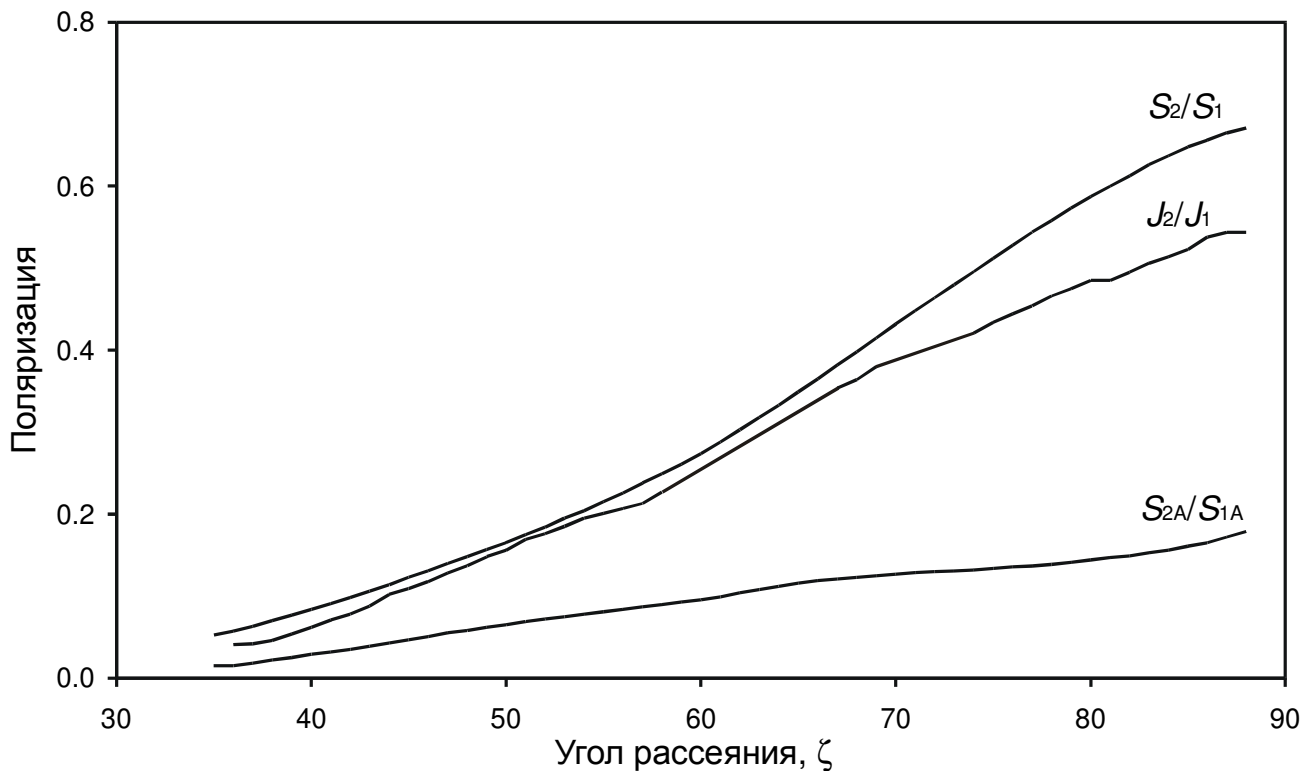


Рисунок 4. Поляризация фона неба, засвеченного Луной (J_2/J_1), полного однократного рассеяния (S_2/S_1) и тропосферного аэрозольного однократного рассеяния (S_{2A}/S_{1A}) по данным августа 2009 года.

На рисунке 4 показаны зависимости поляризации всего фона рассеянного излучения (J_2/J_1), однократного рассеяния в тропосфере (S_2/S_1) и его аэрозольной фракции (S_{2A}/S_{1A}) от угла ζ . Поляризационная зависимость весьма типична для тропосферного аэрозоля и оказывается в хорошем согласии с данными лабораторного исследования аэрозольных частиц [12-13].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было проведено построение двухкомпонентной (с учетом поляризации) функции рассеяния в тропосферной среде в ночной период на основе измерений фона сумеречного и ночного неба. Проведение пассивного зондирования аэрозоля в течение ночи становится возможным благодаря использованию Луны в качестве источника излучения. При обработке наблюдений использовался аппарат, развитый для анализа фона ночного неба [2]. Вклад рассеяния лунного света в фон ночного неба является определяющим, даже когда Луна располагается вблизи горизонта. Это во многом расширяет возможности метода.

Хотя геометрия проведения измерений позволяет построить аэрозольную функцию рассеяния только в пределах от 30° - 40° до примерно 90° , это дает возможность определить две важные характеристики, связанные с микрофизическими свойствами аэрозоля: степень увеличения при малых углах и поляризацию при углах, близких к 90° . Разумеется, информация об оптических свойствах атмосферы в ночной период может быть еще более расширена при использовании широкоугольных (вплоть до 180°) приемных камер.

В заключение авторы хотели бы поблагодарить Ю.И. Великодского (НИИ астрономии Харьковского национального университета, Украина) за ряд ценных замечаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пясковская-Фесенкова Е.В. Исследование рассеянного света в земной атмосфере. Москва, АН СССР, 1957. 120 стр.
2. Угольников О.С., Маслов И.А. Широкоугольная поляриметрия ночного неба. Измерения свечения атмосферы и зодиакального света // Космические исследования. 2005. Т.43, №1. Стр.19-26.
3. Фесенков В.Г. О строении атмосферы (фотометрический анализ сумерек) // Труды Главной российской астрофизической обсерватории. 1923. Т. 2. Стр. 7-56.
4. Розенберг Г.В. Сумерки. Москва, Изд-во физ.-мат. лит-ры. 1963, 380 стр.
5. Угольников О.С., Маслов И.А. Поляризационные исследования вклада аэрозольного рассеяния в свечение сумеречного неба // Космические исследования. 2005. Т.43. №6. Стр.424-432.
6. Угольников О.С., Маслов И.А. Исследования стратосферного аэрозольного слоя на основе поляризационных измерений сумеречного неба // Космические исследования. 2009. Т.47, №3, Стр.198-207.
7. 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.
8. Угольников О.С. Фотометрия и поляриметрия сумеречного неба. Проблема многократного рассеяния света в период сумерек // Космические исследования. 1999. Т.37. № 2. Стр.168-175.
9. 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.
10. Корохин В.В., Великодский Ю.И., Шкуратов Ю.Г., Маль У. Исследование фазовой зависимости яркости и цвета лунной поверхности по данным интегральной фотометрии // Астрономический вестник. 2007. Т.41. №1. Стр.1-9.
11. Lane A.P., Irwine W.M. Monochromatic phase curves and albedos for the lunar disk // Astronomical Journal. 1973. V.78. №3. P.267-277.
12. Volten H., Munoz O., Rol E., de Haan J.F., Vassen W., Hovenier J., Muinonen K., Nousiainen T. Scattering matrices of mineral aerosol particles at 441.6 nm and 632.8 nm // Journal of Geophysical Research. 2001. V.106. №17. P.375-401.
13. Munoz O., Volten H., de Haan J.F., Vassen W., Hovenier J.W. Experimental determination of scattering matrices of randomly oriented fly ash and clay particles at 442 and 633 nm // Journal of Geophysical Research. 2001. V.106. №22. P.833-844.

SCATTERING FUNCTION OF TROPOSPHERIC AEROSOL BASED ON THE TWILIGHT AND NIGHT SKY POLARIMETRY

O.S. Ugolnikov¹, I.A. Maslov^{1,2}

¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences,
Profsoyuznaya st., 84/32, 117997 Moscow Russia

²Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University,
Universitetskii prosp., 13, 119992, Moscow Russia

The paper contains the photometric and polarimetric analysis of the sky background near the zenith during the twilights and the nights of different years and seasons. The period of increased troposphere aerosol content during the summer 2009 is noted. The aerosol scattering of solar emission is separated from the total twilight sky background, and the same of lunar emission is taken from the night sky background. The results are compared with the data of relatively clear troposphere of winter 2006. The observational data is used to build the polarization scattering function of tropospheric aerosol particles during the nighttime.