

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТЕОРНОЙ ПЫЛИ И СТРАТОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СУМЕРЕЧНОГО НЕБА

О.С. Угольников, И.А. Маслов

Институт Космических исследований Российской Академии наук

ВВЕДЕНИЕ

Метод «сумеречного зондирования» атмосферы известен достаточно давно. На его эффективность для исследования вертикального строения земной атмосферы над наблюдателем обратил внимание известный советский астроном В.Г. Фесенков в своей пионерской работе [1]. Метод основан на том, что при погружении Солнца под горизонт земная тень поднимается над наблюдателем, и фон сумеречного неба создается рассеянием солнечного излучения во все более высоких слоях атмосферы. Измеряя яркость фона неба в различные периоды сумерек, мы исследуем рассеивающие свойства атмосферы на различных высотах.

Сумеречному методу зондирования атмосферы посвящена монография Г.В. Розенберга [2], в которой изложен обзор теоретических и наблюдательных результатов на то время. В этой книге отмечена основная проблема метода – необходимость учета многократного рассеяния света в атмосфере. Были представлены различные способы решения этой проблемы, но они носили лишь приближенный характер и часто приводили к противоречивым результатам. Корректный теоретический учет многократного рассеяния стал возможным лишь к концу XX века, с появлением мощной вычислительной техники.

Объем экспериментальных данных и возможность исследовать свойства атмосферы существенно расширяются, если наряду с яркостью сумеречного неба измерять и его поляризацию, что было также отмечено В.Г. Фесенковым [3]. Различные компоненты фона неба сильно отличаются по своим поляризационным свойствам. В частности, молекулярное рассеяние под углом 90° (что имеет место в зените вблизи восхода и захода Солнца) практически полностью поляризовано, многократное рассеяние поляризовано существенно слабее, рассеяние на частицах пыли и аэрозоля также поляризовано слабо, значительно отличаясь также распределением яркости по небосводу. Тем самым, проводя измерения поляризации сумеречного неба, мы получаем дополнительную информацию для разделения разных составляющих фона неба. Метод выделения многократного рассеяния, основанный на поляризационных измерениях, был предложен авторами статьи в работах [4, 5], его результаты оказались в хорошем согласии с данными численного моделирования [6]. Вклад многократного рассеяния в яркость сумеречного неба оказывается достаточно большим, особенно в фиолетовой части спектра, где уже во время захода Солнца он превосходит 50%.

Во время максимума больших метеорных потоков в том полушарии Земли, которое обращено к радианту потока (и где радиант располагается высоко над горизонтом) в верхнюю атмосферу выпадает большое количество метеорной пыли. Это может привести к увеличению рассеивающей способности в стратосфере и мезосфере и к росту яркости сумеречного неба в тот момент, когда эффективное рассеяние света происходит в этих слоях. Данный эффект наблюдался для Квадрантид [7], а затем и для многих других потоков, включая Леониды во время его вспышки в 1998 и 1999 годах [8]. Однако в этих экспериментах измерялась только интенсивность фона неба. В настоящей работе выделение пылевой компоненты атмосферы будет производиться на основе более чувствительных поляризационных измерений. Основной акцент будет сделан на пылевых слоях в верхней атмосфере, возможно имеющих космическое происхождение. Приземный аэрозоль также может быть обнаружен и исследован на основе поляризационных измерений сумеречного неба, эти исследования описаны в работе [9].

НАБЛЮДЕНИЯ

Поляризационные измерения сумеречного неба производились короткофокусной камерой, состоящей из ПЗС-матрицы ST-6, объектива «Юпитер-3» (фокусное расстояние 50 мм, 1:1.5) и вращающегося поляризационного фильтра «Soligor». Наблюдения проводились в спектральной полосе с эффективной длиной волны 5250 Å. Данная полоса близка к стандартной полосе V, по измерениям звезд на экспозициях ночного неба инструментальная величина m связана со стандартной величиной V и цветом $B - V$ следующим образом:

$$(m - V) = 0.06 \cdot (B - V).$$

В указанной спектральной полосе поляризационный фильтр имеет практически идеальные характеристики (собственная поляризация более 99.9%). Наблюдения проводились на Южной станции ГАИШ (поселок Научный, Крым).

На рисунке 1 показаны зависимости степени поляризации фона неба в зените от зенитного расстояния Солнца для различных лет и сезонов наблюдений в 2000, 2002 и 2003 годах. Для сравнения приведены также результаты модельных расчетов, проведенных в Институте Физики Атмосферы РАН [6] для трех типов приземного аэрозоля – континентального, морского и промышленного.

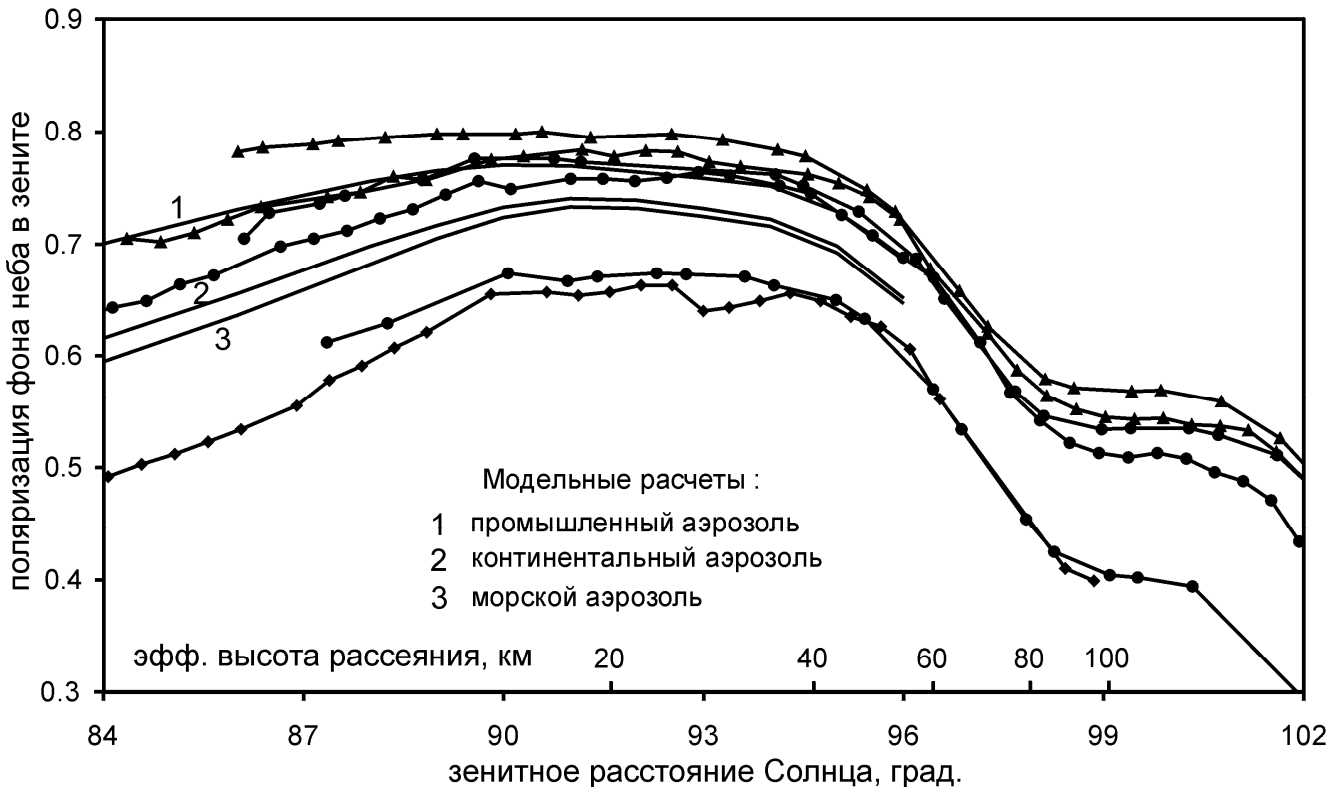


Рисунок 1. Зависимости поляризации фона неба от зенитного расстояния Солнца для ряда сумерек в 2000, 2002 и 2003 годах в сравнении с модельными кривыми.

На графиках (как экспериментальных, так и теоретических) видно уменьшение поляризации фона неба при зенитном расстоянии Солнца, меньшем 90° , когда солнечные лучи хорошо освещают тропосферу, и эффективная высота рассеяния меньше 15-20 км. Это уменьшение связано с приземным (тропосферным) аэрозолем. С наступлением сумерек поляризация выходит на постоянный уровень, на котором остается, пока зенитное расстояние Солнца не достигает 94° - 95° . Далее поляризация уменьшается вследствие быстрого увеличения вклада многократного рассеяния в нижних слоях атмосферы. Мы видим, что хотя экспериментальные кривые получены в разные годы и сезоны, их вид при зенитном расстоянии Солнца, большем

90°, совершенно одинаков, они лишь сдвинуты друг относительно друга как единое целое. Причина состоит в том, что все изменения связаны только с переменной яркостью и поляризацией многократного рассеяния. Появление аэрозольного рассеяния в верхних слоях атмосферы должно нарушать данную картину, приводя к уменьшению поляризации в течение отдельных периодов сумерек, когда эффективная высота рассеяния соответствует высоте аэрозольного слоя. Последующие главы работы посвящены поиску подобных эффектов.

ОБНАРУЖЕНИЕ МЕТЕОРНОЙ ПЫЛИ В МЕЗОСФЕРЕ

После возвращения к Солнцу кометы Темпеля-Гуттля (55P) высокая активность метеорного потока Леониды, порожденного этой кометой, сохранялась в течение нескольких лет. Последний раз она наблюдалась в 2002 году, дважды в течение одних суток (19 ноября) достигнув 2500 метеоров в час [10]. Во время первого из этих максимумов, наступившего в 04ч10м по Всемирному времени, радиант располагался на высоте 67° в пункте наблюдений. Таким образом, в верхнюю атмосферу над этим пунктом должно было попасть достаточное количество метеорной пыли.

Поляризационные измерения сумеречного неба проводились, начиная с вечерних сумерек 21 ноября. На рисунке 2 показаны зависимости степени поляризации фона неба в зените от зенитного расстояния Солнца, полученные в конце ноября и начале декабря 2002 года. Из экспериментальных данных здесь вычтена компонента, связанная с рассеянием лунного света, если Луна во время сумерек находилась над горизонтом. Уже на этом рисунке можно заметить уменьшение поляризации в темные вечерние сумерки 21 ноября, когда эффективная высота рассеяния превосходит 90 км. Еще лучше этот эффект будет виден, если мы исключим эффект переменного многократного рассеяния, о котором говорилось выше, и переместим все кривые к единому уровню в светлый период сумерек (рисунок 3). Небольшой эффект, связанный с метеорной пылью, просматривается и в следующую дату наблюдений – утренние сумерки 27 ноября. Подробнее метод обнаружения метеорной пыли описан в работе [11].

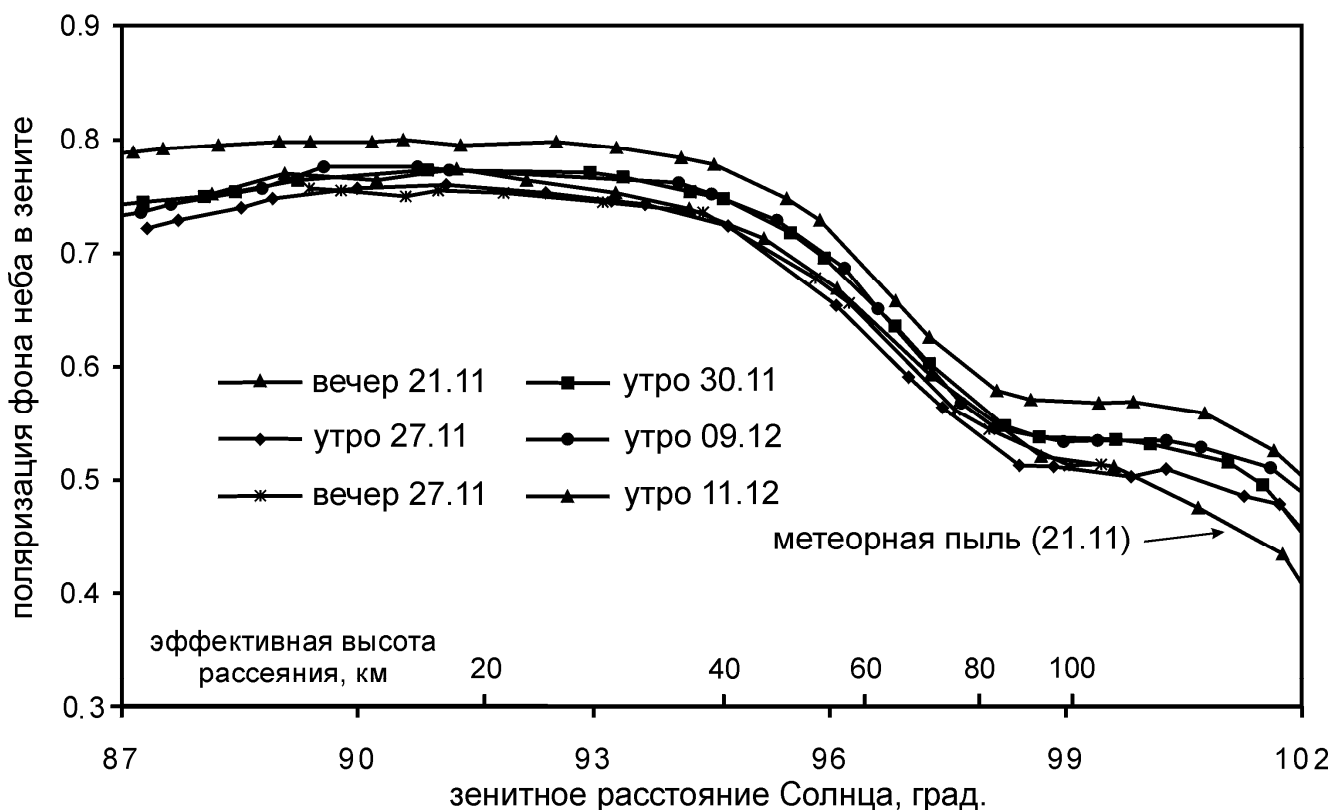


Рисунок 2. Зависимости поляризации фона неба от зенитного расстояния Солнца в ноябре-декабре 2002 года.

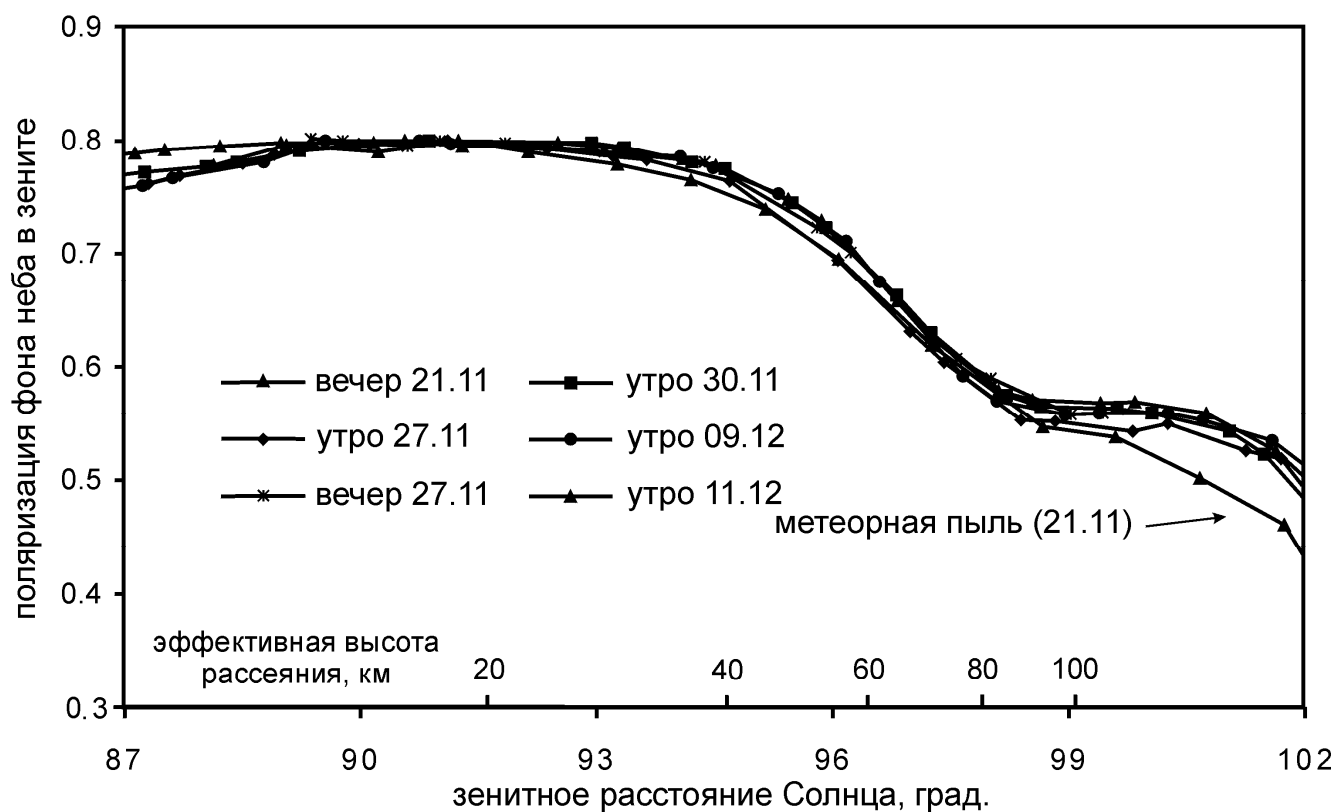


Рисунок 3. Зависимости поляризации фона неба от зенитного расстояния Солнца в ноябре-декабре 2002 года, исправленные за изменчивость многократного рассеяния.

ОБНАРУЖЕНИЕ СТРАТОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ

Стратосфера – следующий за тропосферой по высоте слой атмосферы – обычно не содержит большого количества пыли и аэрозоля. Исключение составляют лишь высокие широты, на которых могут появляться полярные стратосферные облака, а также периоды после крупных вулканических извержений. Последнее такое извержение (вулкан Пинатубо) произошло в 1991 году, и за весь период наблюдений (с 2000 года) заметное присутствие стратосферного аэрозоля не обнаруживалось. Однако он неожиданно появился в декабре 2006 года.

На рисунке 4 показаны зависимости степени поляризации от зенитного расстояния Солнца для четырех вечерних безлунных сумерек 7-10 декабря 2006 года в сравнении с весьма типичной зависимостью для утренних сумерек 9 декабря 2002 года, также безлунных. Мы видим, что при схожести поляризации как в самые светлые, так и в темные сумерки в декабре 2006 года наблюдается провал при зенитных расстояниях Солнца от 90° до 94°, что соответствует эффективной высоте рассеяния от 20 до 40 км. Аналогичный эффект наблюдается и в утренние сумерки тех же дат. Наблюдаемый эффект отличается заметной переменностью от сумерек к сумеркам, что можно рассматривать как еще одно подтверждение его связи со стратосферным аэрозолем. Кроме самой поляризации, стратосферный аэрозоль также сказывается на градиентах яркости и поляризации по небосводу. Анализ этих величин с помощью метода, аналогичного использованному в [9] для тропосферного аэрозоля, позволил оценить вклад стратосферного аэрозольного рассеяния в общую яркость неба (около 10%), а также важную физическую характеристику аэрозольного рассеяния – поляризацию при рассеянии под прямым углом. Во избежание различных систематических ошибок данная оценка проводилась отдельно для вечерних и утренних сумерек. Полученные значения приведены в таблице.

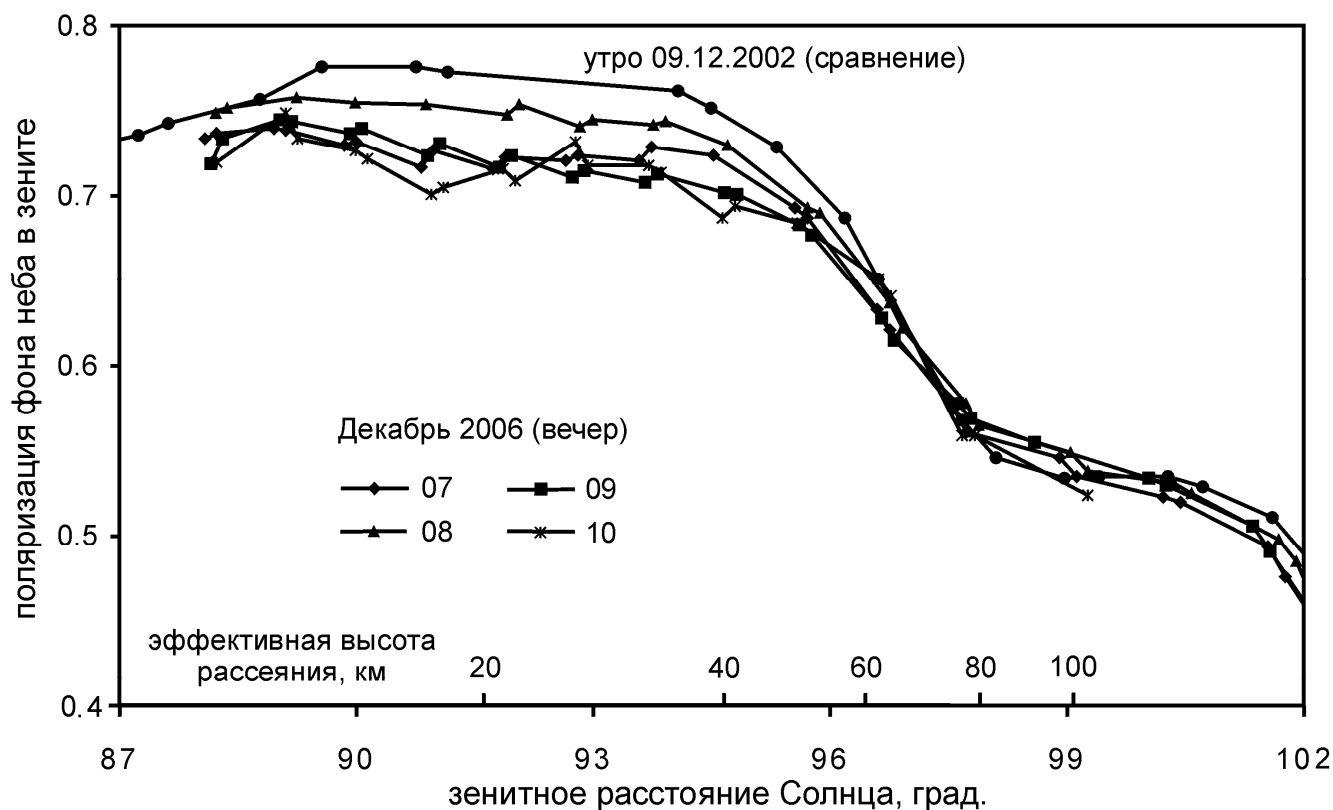


Рисунок 4. Зависимости поляризации фона неба от зенитного расстояния Солнца в декабре 2006 года в сравнении с данными декабря 2002 года.

Сумерки	Количество	Поляризация
Вечерние	4	0.26 ± 0.04
Утренние	3	0.33 ± 0.07
Усреднение	7	0.27 ± 0.04

Поляризация рассеяния под прямым углом для стратосферного аэрозоля оказывается несколько выше, чем для тропосферного (около 0.2 [9]), что вполне естественно указывает, что стратосферные аэрозольные частицы мельче тропосферных. Обращает на себя внимание высокая (по сравнению с тропосферой) точность определения поляризации аэрозольного рассеяния.

Вопрос об источнике появления стратосферного аэрозоля в Крыму в декабре 2006 года остается открытым. Возможно, что в условиях климатических аномалий, господствовавших над Европой в это время, он мог быть занесен из полярной стратосферы. Ответ на вопрос о происхождении стратосферного аэрозоля может быть получен только после дальнейших наблюдений, запланированных на 2007 год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье на примере метеорной пыли и стратосферного аэрозоля был рассмотрен поляризационный метод выделения и исследования малых рассеивающих примесей в атмосфере. Этот метод отличается высокой чувствительностью – рассмотренные выше аэрозольные фракции малозаметны и трудны для исследования при анализе только интенсивности фона сумеречного неба. Данные о поляризации дают возможность исследовать физические свойства аэрозольных частиц. При измерении фона сумеречного неба вдоль всего вертикала Солнца можно построить функцию рассеяния (угловое распределение рассеянного

излучения) аэрозольной частицы, что может дать информацию не только о ее размере, но и форме и происхождении.

В завершение работы приведем один пример, иллюстрирующий высокую чувствительность поляризационных измерений к наличию слабых компонент в фоне неба. Очевидно, что фон рассеянного излучения в атмосфере может создавать не только Солнце. В темные сумерки и ночью заметный вклад в яркость фона неба вносит рассеяние лунного света (эту компоненту фона неба, измеренную ночью, необходимо было пересчитать на время сумерек и вычесть для поиска метеорной пыли). Измерения поляризации фона неба безлунной ночью при условии высокой прозрачности атмосферы позволяют обнаружить рассеянный фон от значительно более слабого объекта – Венеры. На рисунке 5 показана зависимость величины поляризации фона ночного неба в зените в направлении поляризации, перпендикулярном направлению на Венеру, от зенитного расстояния Венеры. Видно, что поляризация практически замываема в инструментальных шумах до восхода планеты, но четко появляется после него. Это лишний раз доказывает эффективность поляризационных исследований фона как сумеречного, так и ночного неба, в частности для выделения и анализа зодиакального света и других поляризованных составляющих [12].

Работа поддержана Российским Фондом Содействия Отечественной Науке.

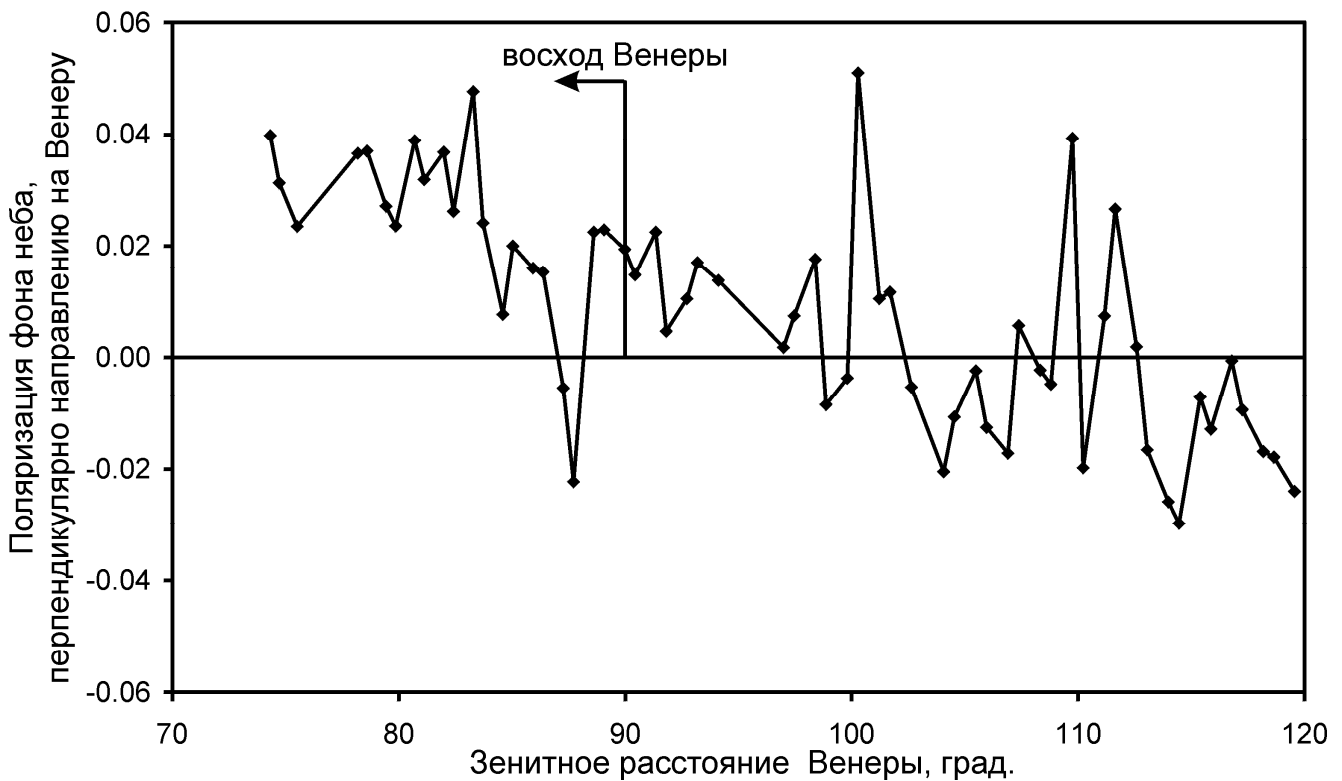


Рисунок 5. Появление поляризации фона ночного неба, связанной с рассеянием света Венеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фесенков В.Г. О строении атмосферы (фотометрический анализ сумерек) // Труды Главной российской астрофизической обсерватории. 1923. Т. 2. С. 7.
2. Розенберг Г.В. Сумерки. М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры. 1963
3. Фесенков В.Г. О поляризационном методе исследования сумеречных явлений // Астрон. журн. 1966. Т. 43. С. 198.

4. Угольников О.С. Фотометрия и поляриметрия сумеречного неба. Проблема многократного рассеяния света в период сумерек // Космические исследования. 1999. Т. 37. № 2. С. 168-175.
5. 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.
6. Ugolnikov O.S., Postlyakov O.V., Maslov I.A., 2004. Effects of multiple scattering and atmospheric aerosol on the polarization of the twilight sky. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 88, 233-241.
7. Link F., Robley R., 1971. Meteoric contamination of the upper atmosphere by the Quadrantid Shower. *Planetary and Space Science*. 19, 1585-1587.
8. Matshvili N., Matshvili G., Matshvili I., Gheondjian L., Kapanadze Z., 2000. Dust particles in the atmosphere during the Leonid meteor showers of 1998 and 1999. *Earth, Moon, Planets*. 82-83, 489-504.
9. Угольников О.С., Маслов И.А. Поляризационные исследования вклада аэрозольного рассеяния в свечение сумеречного неба // Космические исследования. 2005. Т.43, № 6, С. 424-432.
10. Arlt R., Krumov V., Buchmann A., Kac J., Verbert J., 2002. Bulletin 18 of the International Leonid Watch: Preliminary Analysis of the 2002 Leonid Meteor Shower. WGN, the Journal of the International Meteor Organization. 30, 205-212.
11. 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 (in press), <http://tanatos.asc.rssi.ru/~ugol/Leonids.pdf>.
12. Угольников О.С., Маслов И.А. Широкоугольная поляриметрия ночного неба. Измерения свечения атмосферы и зодиакального света // Космические исследования. 2005. Т.43, № 1, С. 19-26.