

УДК 525.75

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ФОТОМЕТРИИ ЛУННЫХ ЗАТМЕНИЙ

О.С. Угольников, И.А. Маслов

ATMOSPHERE REMOTE SENSING BASED ON THE LUNAR ECLIPSES PHOTOMETRY

O.S. Ugolnikov, I.A. Maslov

Работа посвящена методу измерения горизонтальной прозрачности атмосферы на различных высотах вдоль лимба Земли на основе фотометрии Луны во время полных лунных затмений. Данный метод является единственным наземным методом дистанционного зондирования атмосферы на расстоянии в несколько тысяч километров от точки наблюдения. Метод применяется к результатам наблюдений двух лунных затмений в 2004 г.

The work is devoted to the method of horizontal atmosphere transparency measurements at different altitudes over the limb of the Earth based on the Moon photometry during the total lunar eclipses. This is the only ground-based method of atmosphere remote sensing at the distance of several thousand kilometers from the observation point. The method is used for the results of observations of two total lunar eclipses in 2004.

Лунные затмения – астрономические явления, во время которых Луна вступает в тень Земли. В это время она не освещается прямыми солнечными лучами и была бы темной, если бы не атмосфера нашей планеты. Преломляясь при распространении сквозь плотную газовую оболочку Земли, излучение попадает в область геометрической тени. По удивительному стечению обстоятельств максимальный угол преломления горизонтальных лучей в атмосфере (1.1°) практически совпадает с экваториальным параллаксом Луны (около 1°), поэтому вся поверхность Луны остается освещенной, даже если она находится в центре конуса тени. Однако степень ее освещенности существенно ослабляется по сравнению с обычными условиями вне затмения из-за явления рефракционной дивергенции (расхождения пучка света при преломлении) и его значительного поглощения при распространении сквозь атмосферу. Последний фактор существенно зависит от длины волны, усиливаясь в коротковолновой области спектра, где излучение поглощается практически полностью. Мы регистрируем только длинноволновое излучение, и Луна во время затмения имеет темно-красный цвет. Поглощение также существенно зависит от времени и координаты точки Земли, над которой проходит луч. Диапазон изменений очень широк, и затмения сильно отличаются видом и яркостью Луны. Известны исторические случаи, когда наблюдатели ставили под сомнение сам факт наступления затмения. Иногда наступают затмения, во время которых Луна практически «исчезала» с неба.

Столь сильная чувствительность характеристик затмения к атмосферным условиям указывает на возможность исследования самой атмосферы по наблюдениям лунных затмений. Поскольку Луна имеет значительные угловые размеры и движется сквозь земную тень во время затмения, мы получаем возможность измерить величину прозрачности атмосферы над различными точками Земли, удаленными на несколько тысяч километров от пункта наблюдения, для широкого диапазона значений угла преломления, т. е. для широкого диапазона высот в атмосфере. Исследованиям атмосферы Земли по наблюдениям лунного затмения посвящена классическая монография [1], в

которой приведен полный обзор теоретических работ и наблюдательных данных на то время.

Целью настоящей работы является исследование аэрозольной компоненты тропосферы над лимбом Земли по наблюдениям полных лунных затмений 4 мая и 28 октября 2004 г. Подробный анализ наблюдений, процедуры обработки и вычисления величины аэрозольного поглощения приведен в [2]. Наблюдения проводились в видимой и ближней инфракрасной области спектра, выбранной так, что в нее не попадали полосы селективного поглощения атмосферных газов, и атмосферное ослабление происходит только за счет молекулярного и аэрозольного рассеяния.

На рис. 1 приведена оптическая структура земной тени (распределение величины ослабления яркости лунного света) во время затмения 4 мая 2004 г. в полосе, вычерченной движением Луны сквозь тень. Видно, что тень не является центрально-симметричной, что сразу указывает на существенную зависимость свойств атмосферы от широты. В частности, экваториальные области тени особенно темные, т. е. поглощение света в экваториальной области Земли сильнее.

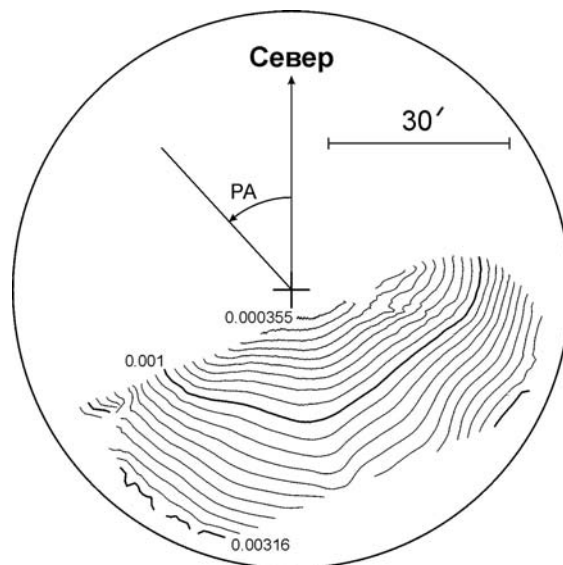


Рис. 1. Оптическая структура земной тени во время затмения 4 мая 2004 г.

На рис. 2 приведены зависимости яркости лунной поверхности от углового расстояния от центра тени для трех позиционных углов РА (см. рис. 1), соответствующих трем разным областям на лимбе Земли. Сплошная и пунктирная линии соответствуют данным численного моделирования для газовой атмосферы с температурой стратосферы 200 К и с приземной температурой 290 К (сплошная линия) и 260 К (пунктирная линия). Можно видеть, что в полутени Земли (области, где Солнце еще частично освещает поверхность Луны) и во внешних областях тени яркость Луны практически совпадает с данными численного моделирования для газовой атмосферы. И лишь в глубоких областях тени измеренная поверхностная яркость Луны становится меньше теоретической. Это говорит о наличии дополнительного поглощения света, появляющегося на малых высотах, где лучи света сильно преломляются и попадают в глубокие области тени. Подобная картина наблюдается и для затмения 28 октября 2004 г. Очевидно, что источником этого дополнительного поглощения является тропосферный аэрозоль.

Построенный в [2] метод решения обратной задачи позволил вычислить величины прозрачности атмосферного аэрозоля к касательным солнечным лучам с различными высотами перигея для точек лимба Земли. На рис. 3 приведены результаты вычисления для затмения 4 мая 2004 г. Мы видим, что на высотах 15 км и более поглощение света атмосферным аэрозолем становится несущественным для всех широт. На высоте 10 км аэрозольное поглощение величиной порядка 10^{-3} км⁻¹ появляется в экваториальных и полярных широтах, причем в последнем случае очевидна корреляция с распределением облачности на дату наблюдения. В то же время верхняя тропосфера в тропических широтах остается прозрачной.

На высоте 6 км мелкомасштабные изменения величины прозрачности атмосферы замываются из-за значительных угловых размеров Солнца, затрудняющих решение обратной задачи. Характер глобального

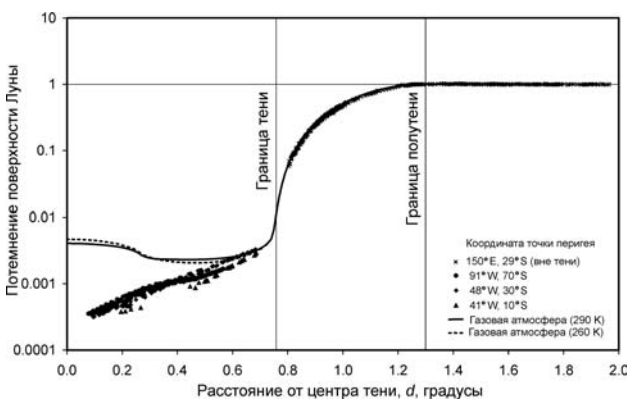


Рис. 2. Зависимость потемнения яркости поверхности Луны от углового расстояния от центра тени для разных позиционных углов (точек перигея луча) для затмения 4 мая 2004 г.

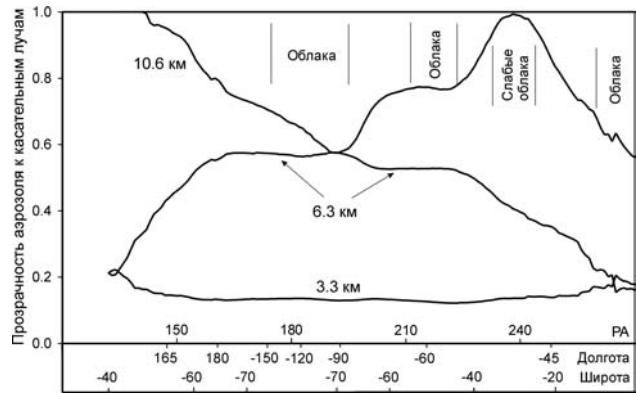


Рис. 3. Степень прозрачности атмосферного аэрозоля к касательным солнечным лучам на разных высотах вдоль лимба Земли.

распределения существенно отличается от высоты 10 км: налицо монотонное ухудшение прозрачности от полярных широт к экваториальным, что является причиной уменьшения яркости экваториальных областей тени. Отметим, что данная асимметрия наблюдается практически у всех затмений и замечена уже давно [1]. Наконец, приземные слои атмосферы всегда богаты аэрозолем и касательные лучи Солнца поглощаются в них практически полностью.

Полученные выводы о вертикальном распределении атмосферного аэрозоля находятся в удовлетворительном согласии с данными других методов, связанных с измерением рассеяния света на аэрозольных частицах [3]. Вертикальное разрешение метода (3 км) примерно совпадает с космическими измерениями прозрачности атмосферы по касательной траектории [4], что делает наблюдения лунных затмений эффективными для измерений как атмосферного аэрозоля, так и малых газовых составляющих в зависимости от рабочего спектрального интервала.

Работа проведена при поддержке Фонда содействия отечественной науке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линк Ф. Лунные затмения. М.: Иностранная литература, 1962. 200 с.
2. Ugolnikov O.S., Maslov I.A. Atmospheric aerosol limb scanning by total lunar eclipses photometry // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2006. (in print). Угольников О.С. Поляризационные исследования атмосферы Земли // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды IX Конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде». Иркутск, 2006.
4. Noel S., Burrows J.P., Bovensmann H., et al. Atmospheric trace gas sounding with SCIAMACHY // Advances in Space Research. 2002. V. 29. P. 1819–1824.

Институт космических исследований РАН, Москва, ugol@tanatos.asc.rssi.ru