

УДК 523.4

А. В. Мороженко

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27

Поляриметрия сумеречного неба и стратосферный аэрозоль

Для изучения физических свойств стратосферного аэрозоля (на высотах больше 30 км) предложена модификация метода поляриметрических измерений сумеречного неба, которые традиционно велись в зените. Как правило, это ограничивало фазовые углы значениями 80—100°. Предлагается устанавливать телескоп по склонению на значение склонения Солнца, а степень поляризации сумеречного неба измерять на различных значениях часового угла. Это позволит не только расширить интервал фазовых углов, но и планировать наблюдения так, чтобы получать данные о фазовой зависимости степени поляризации света, рассеянного слоями атмосферы на различных высотах.

ПОЛЯРИМЕТРІЯ СУТІНКОВОГО НЕБА ТА СТРАТОСФЕРНИЙ АЕРОЗОЛЬ, Мороженко О. В. — Для вивчення фізичних властивостей стратосферного аерозоля (на висотах понад 30 км) запропоновано модифікацію методу поляриметричних спостережень сутінкового неба, які традиційно велись в зеніті. Як правило, це обмежувало фазові кути значеннями 80—100°). Пропонується встановлювати телескоп по схиленню на значення схилення Сонця, а значення ступеня поляризації вимірювати на різних часових кутах. Це дозволить не лише розширити інтервал фазових кутів, але й планувати спостереження так, щоб отримувати дані про фазові залежності ступеня поляризації світла, розсіяного шарами атмосфери на різних висотах.

POLARIMETRY OF TWILIGHT SKY AND STRATOSPHERIC AEROSOL, by Morozhenko A. V. — To investigate physical properties of the stratospheric aerosol at heights more than 30 km, we propose a modification of the method for polarimetric measurements of twilight sky. Such measure-

ments were customary made in zenith, which restricts the values of the phase angle to 80—100°. We propose to mount a telescope in the θ -coordinate on the Sun's declination and to measure the polarization degree for various hour angle. It will enables one not only to increase phase angle range, but also to plane observations in such a way as to obtain data on phase dependences of the polarization degree of the light scattered by the atmosphere layers at various heights.

Как известно, стратосферный аэрозоль влияет не только на тепловой режим Земли, но и на формирование озонового слоя, максимум концентрации молекул которого располагается на высотах, несколько меньших 30 км. Мера этого влияния зависит от функции спектральной зависимости оптической толщины, т. е. спектральных значений комплексного показателя преломления и функции распределения частиц по размерам.

Как было показано [6], для 10-процентного уменьшения концентрации озонового слоя достаточно, чтобы оптическая толщина стратосферного аэрозоля на длине волны $\lambda = 1$ мкм увеличилась на 0.003 (при среднегеометрическом радиусе частиц $r_0 = 0.05$ мкм) или 0.03 ($r_0 = 0.10$ мкм). Данные о размере стратосферного аэрозоля важны еще для прогноза степени запыленности, потому что очищение верхних слоев атмосферы происходит только за счет оседания частиц под действием силы тяжести, скорость которого, например при стоковом оседании, обратно пропорциональна квадрату радиуса.

К настоящему времени, насколько нам известно, имеются только данные об оптической толщине стратосферного аэрозоля в ближней инфракрасной области спектра, которые были получены по спектрофотометрическим измерениям с бортов космических аппаратов ослабления блеска Солнца земной атмосферой [12]. Что касается данных о комплексном показателе преломления и функции распределения частиц по размерам, то они неизвестны. Дело в том, что наиболее достоверную информацию об этом можно получить только из анализа фазовой или спектральной (в широком интервале длин волн) зависимостей степени поляризации и отражательной способности [1, 4, 5, 11, 13], получение которых возможно только с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ). Если учесть, что стратосферная составляющая оптической толщины аэрозоля значительно меньше тропосферной, то такие измерения необходимо вести в далеком ультрафиолете ($\lambda < 300$ нм), где регистрируемое диффузно отраженное излучение формируется исключительно надозоновым слоем. В этой области спектра полностью отсекается влияние не только земной поверхности, но и тропосферы. К сожалению, работающий уже сейчас на орбите поляриметр рассчитан на видимую и ближнюю инфракрасную области спектра, в которых при формировании поля диффузно отраженного излучения доминируют подстилающая поверхность и тропосфера (в том числе и облака). Поэтому очень сомнительно, что по данным этих

экспериментов можно будет получить достоверную информацию о стратосферном аэрозоле.

В настоящее время нами [2, 3, 7] предложены проекты поляризметрических эксперименты в УФ-области спектра, в том числе и на Молодежный микроспутник, но, к сожалению, реализация этих проектов идет очень медленно, и даже примерно нельзя говорить о годе их реализации. Поэтому необходимо искать новые источники информации о физических свойствах стратосферного аэрозоля. По нашему мнению, ее можно получить по данным поляризметрических измерений свечения сумеречного неба, которые очень активно велись в середине 20-го столетия, а их основные результаты, которые обобщены в работе [8], сводятся к следующему.

1. Измерения без светофильтра показали, что в различные дни степень поляризации P составляет 30—50 %, т. е. практически в два раза меньше, чем для газовой атмосферы. Зависимости степени поляризации от высоты h рассеивающего слоя показали, что на высотах $20 < h < 200$ км степень поляризации систематических изменений не показывает, хотя для больших высот имеет место ее уменьшение с высотой. Поскольку измерения на больших высотах соответствуют большим значениям зенитного расстояния Солнца, а значит слабой интенсивности свечения сумеречного неба, то отмеченное уменьшение степени поляризации может быть следствием деполяризующего влияния естественного фона неба, а не реальным фактом.

2. При изменении зенитного расстояния Солнца от 91 до 102° степень поляризации уменьшается.

3. Степень поляризации увеличивается при увеличении длины волны.

4. Обнаруживалось отклонение (в пределах $\pm 10^\circ$) положения плоскости поляризации от радиальной плоскости.

Последующие наблюдения в общих чертах подтвердили эти результаты. Так, например, в работе [9] отмечено следующее.

1. Измерения в период светлых сумерек показывают наличие значительного количества аэрозоля в тропосфере (с верхней границей этого на $h = 15$ км), влияние которого сравнительно невелико на длине волны $\lambda = 525$ нм, но существенно возрастает на $\lambda = 760$ нм. Степень поляризации аэрозоля на фазовом угле 90° оценена примерно в 20 %.

2. Количество стратосферного аэрозоля достаточно мало в последнее время наблюдений, хотя с конца 2006 г. замечено его увеличение. Это проявилось в уменьшении степени поляризации на длине волн $\lambda = 525$ нм при зенитном расстоянии Солнца $91—94^\circ$, что было приписано следствию извержения вулкана Рабаул в Новой Гвинее в октябре 2006 г.

Следовательно, эти данные однозначно указывают на наличие аэрозоля в стратосфере, но ограниченность фазовых углов и отсутствие измерений отражательной способности сумеречного неба делают невозможным строгий анализ с целью определения физических характе-

Значения степени поляризации для чисто газовой атмосферы (P_R) и аэрозоля (P_a) с различными значениями n_r и r_0 (мкм)

θ , град	P_R , %	P_a , %							
		$n_r=1.33$ = 360 нм		$n_r=1.33$ = 650 нм		$n_r=1.50$ = 360 нм		$n_r=1.50$ = 650 нм	
		$r_0 = 0.06$	$r_0 = 0.16$	$r_0 = 0.06$	$r_0 = 0.16$	$r_0 = 0.06$	$r_0 = 0.16$	$r_0 = 0.06$	$r_0 = 0.16$
100	+89	+77	+12	+91	+54	+59	-12	+87	+25
90	+95	+89	+18	+99	+62	+69	-11	+97	+25
80	+89	+92	+24	+96	+66	+74	-11	+96	+23
70	+75	+84	+29	+83	+62	+70	-11	+84	+17
60	+57	+76	+31	+64	+52	+58	-14	+66	+7
50	+40	+48	+29	+44	+36	+41	-21	+46	-4
40	+25	+30	+18	+28	+21	+25	-35	+29	-14
30	+14	+16	+1	+15	+9	+13	-55	+16	-16

ристик аэрозоля и мощности слоя, как это делается для планетных атмосфер [1, 5, 11, 12]. В то же время при изменении методики измерений можно настолько расширить интервал фазовых углов и повысить точность определения степени поляризации, что можно будет сделать оценки физических свойств стратосферного аэрозоля. В качестве иллюстрации чувствительности поляризационных фазовых кривых к изменению среднегеометрического размера частиц r_0 и действительной части показателя преломления n_r в таблице приведены соответствующие расчеты для сферических частиц с нормально-логарифмическим законом распределения их по размерам и дисперсии размеров 0.1 [10].

Поэтому целью этой работы является предложение об модификации процесса наблюдений, которое состоит в том, чтобы телескоп устанавливать не в зенит, а по координате на склонение Солнца. В этом случае за счет изменения часового угла телескопа можно значительно расширить интервал фазовых углов, а также заранее планировать получение информации для выбранной высоты в атмосфере, рассеяние выше которой регистрируется при наблюдениях. Для более однозначной интерпретации, особенно в оценке мнимой части показателя преломления, поляризационные наблюдения необходимо дополнить определениями отражательной способности сумеречного неба. Наконец, учитывая малую интенсивность свечения сумеречного неба, особенно в ранние сумерки и для самих высоких слоев земной атмосферы, необходимо тщательно учитывать деполяризующее влияние естественного фона неба.

В заключение выражаю признательность рецензенту за замечания, учет которых позволил улучшить статью.

1. Бугаенко О. И., Длугач Ж. М., Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Об оптических свойствах облачного слоя Сатурна в видимом участке спектра // Астрон. вестн.

- 1975.—**9**, № 1.—С. 13—21.
2. Відьмаченко А. П., Мороженко О. В., Неводовський С. П., Неводовський П. В. Космічний УФ-поляриметр для дослідження аерозольного шару Землі // Четвертая украинская конференция по космическим исследованиям: Сб. тез. — Киев, 2004.—С. 32.
 3. Відьмаченко А. П., Мороженко О. В., Неводовський С. П., Неводовський П. В. Дослідження стратосферного аерозолі і озону за допомогою Українського молодіжного мікросупутника // Всеукраїнська екологічна конференція. — Київ, 2004.—С. 113—114.
 4. Дольфюс А., Длугач Ж. М., Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Оптические параметры атмосферы и поверхности Марса. П. Пылевые бури // Астрон. вестн.—1974.—**8**, № 4.—С. 211—222.
 5. Мороженко А. В. Оптические параметры атмосферы и поверхности Марса. 1. Аэрозольная составляющая чистой атмосферы // Астрон. вестн.—1974.—**8**, № 3.—С. 121—127.
 6. Мороженко О. В., Шаврина А. В., Велесь О. А. Роль стратосферного аерозолі у формуванні озонового шару // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—**16**, № 4.—С. 364—368.
 7. Мороженко О. В., Шаврина А. В., Велесь О. А. Концепція моніторингу газового та аерозольного (для висот більше 30км) забруднення земної атмосфери з борту Міжнародної космічної станції // Космічна наука і технологія.—2000.—**6**, № 2/3.—С. 68—79.
 8. Розенберг Г. В. Сумерки. — М: Физматгис, 1963.—380 с.
 9. Угольников О. С, Маслов И. А. Исследования атмосферного аэрозоля в широком диапазоне высот на основе поляризационных измерений сумеречного неба // Поляризационная оптика: Тез. докл. Междунар. научно-технической конф., посвященной 50-летию факультета электронной техники МСИ. — М., 2008.—С. 97—98.
 10. Яновицкий Э. Г., Думанский З. О. Таблицы по рассеянию света полидисперсной системой сферических частиц. — Киев: Наук. думка, 1972.—124 с.
 11. Hansen J. E., Hovenier J. W. Interpretation of the polarization of Venus // J. Atmos. Sci.—1974.—**16**, N 4.—P. 1137—1160.
 12. McCornick M. P. Stratospheric aerosol and gas experiment // Long-term monitoring of global climate forcing and feedbacks // NASA Conf. Publ.—1992.—N 3234.—P. 36—39.
 13. Morozhenko A. V., Yanovitskij E. G. The optical properties of Venus and Jovian planets. I. The atmosphere of Jupiter according to polarimetric observations // Icarus.—1973.—**18**, N 4.—P. 583—592.

Поступила в редакцию 29.10.08