

УДК 551.593

В. Д. ВДОВИЧЕНКО, Г. А. КИРИЕНКО, Н. В. СИНЯЕВА

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ СУМЕРЕЧНОГО СЕГМЕНТА

В процессе обработки спектральных наблюдений мезосферных серебристых облаков (МСО), проведенных лабораторией физики Луны и планет Астрофизического института им. В. Г. Фесенкова в 2006 - 2007 годах в Петропавловске в рамках государственной космической программы РК, возникла весьма сложная проблема учета фона сумеречного неба, которая, в конечном счете, заставила авторов рассматривать ее как самостоятельную научную проблему. Первые результаты проведенного исследования представлены в настоящей статье.

Большой интерес для изучения природы мезосферных серебристых облаков (МСО) представляют их спектральные наблюдения. Таких наблюдений существует очень немного, и их результаты достаточно противоречивы. Это становится понятным, если иметь в виду, что учет наложения света сумерек на спектр МСО весьма сложен [1,2].

В ходе экспедиции в Северо-Казахстанскую область в 2007 году для наблюдения МСО был использован светосильный (1:1,5) спектрометр протяженных объектов с 20° полем обзора по всей высоте спектральной щели. По своей конструкции - это спектрометр среднего разрешения (4 нм) с прозрачной дифракционной решеткой 250 штрихов /мм и с регистрацией спектра в первом порядке на широкоформатной (36×24 мм 2) ПЗС-камере STL11000M. Спектры регистрировались в первом порядке вплоть до 1200 нм. Для исключения эффекта наложения второго порядка в области $\lambda > 700$ нм использовался стеклянный фильтр КС-14. Линейная дисперсия составляла 0,82 нм/пкс. Рабочий спектральный диапазон - от 400 до 1100 нм. Участок спектра с $\lambda < 400$ нм обрезался многолинзовой системой питающей и перебрасывающей оптики и чувствительностью ПЗС-матрицы.

Для уверенного отождествления на спектрах деталей регистрируемых полей МСО использовалась дополнительная цифровая фотокамера, размещенная на одной платформе со спектрометром. Направления оптических осей у них совпадали. Наведение на исследуемую область МСО осуществлялось через визирную трубку. Платформа спектрометра могла независимо поворачиваться в вертикальном и азимутальном направлениях. В зависимости от задачи наблюдения угол поворота мог достигать 90° .

Спектрометр вместе с ПЗС камерой прошли тестирование на спектральную чувствительность, равномерность светопередачи по полю, зависимость передачи контраста и линейности светопередачи от температуры охлаждения ПЗС матрицы. Спектральная градуировка спектрометра и стандартных светофильтров ПЗС камеры проводилась по спектрам водородной и ртутной лампы.

Соотношение масштабов регистрируемых полей МСО и их спектрограмм оставалось постоянным. При этом использовались как детали ландшафта в дневное время, так и звезды.

Наблюдения сумеречного сегмента проводились в ясную безоблачную погоду в течение всей ночи, начиная сразу после захода Солнца и вплоть до его восхода. Регистрация спектров сопровождалась параллельной фотосъемкой сумеречного сегмента на цифровую фотокамеру. Оптическая ось спектрометра в основном ориентировалась в северном направлении.

Получение спектров полей МСО в чистом виде – довольно сложная задача. Чаще всего МСО наблюдаются в пределах $3-15^{\circ}$ над горизонтом после захода Солнца, на фоне запыленного сумеречного сегмента, яркость которого, окраска и, соответственно, спектральные характеристики меняются в зависимости от таких факторов как время наблюдения, азимут и глубина погружения Солнца, высота над горизонтом, погодные условия. Близость большого города с интенсивным уличным освещением приводит к появлению в спектре сумеречного сегмента дополнительных линий от ртутных и неоновых ламп. Кроме того, все выше перечисленные характеристики меняются изо дня в день в течение всего сезона наблюдения.

На рисунке 1 представлены ПЗС-спектрограммы сумеречного сегмента в одну и ту же дату, но в

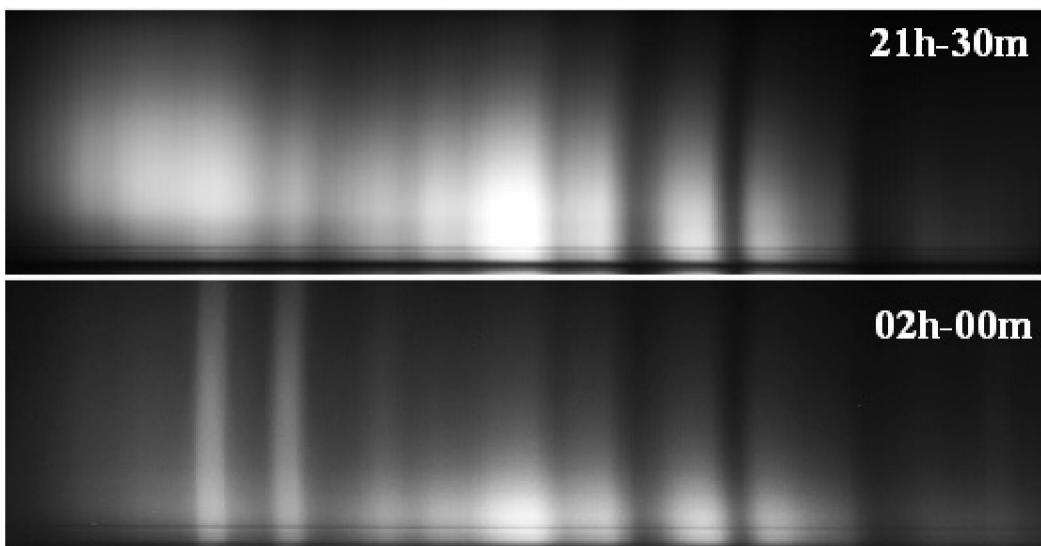


Рис. 1. ПЗС-спектрограммы сумеречного сегмента в одну и ту же дату, но в разное время наблюдения

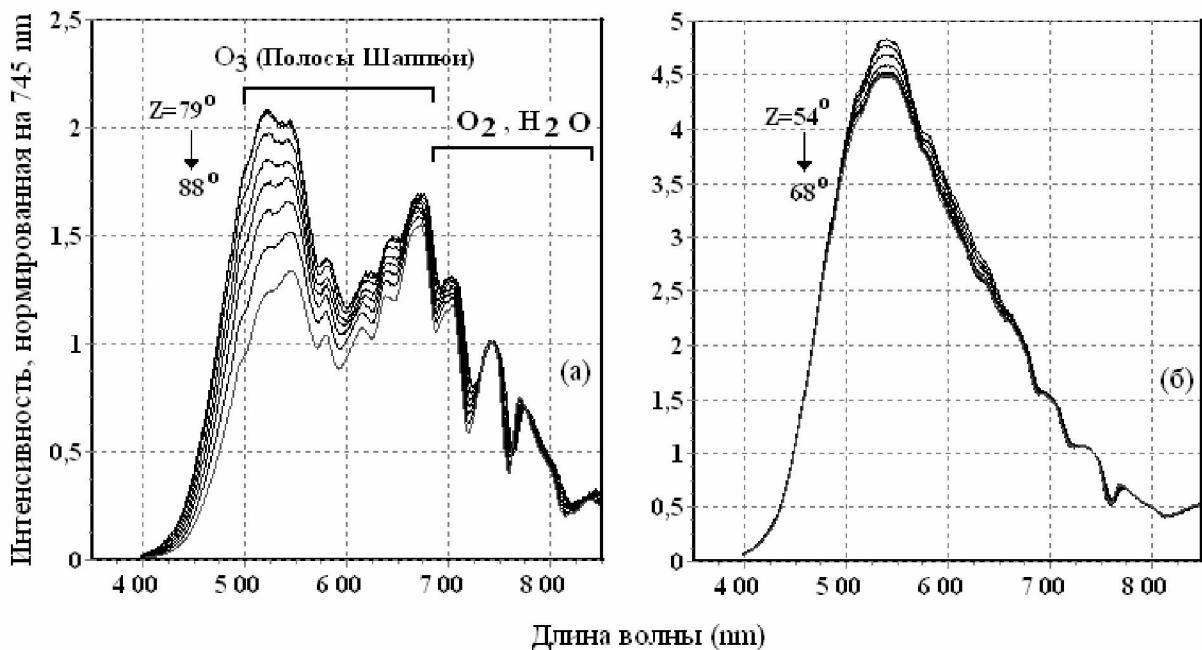


Рис. 2. Спектральные разрезы сумеречного сегмента (а) для зенитных углов $Z = 79^{\circ} - 88^{\circ}$ и дневного голубого неба (б) для $Z = 54^{\circ} - 68^{\circ}$.

разное время наблюдения. В ночное время хорошо видны спектральные линии уличного освещения города Петропавловска (нижняя часть снимка).

В связи с изложенным, особо остро встает вопрос стандартизации спектральных наблюдений полей МСО и сумеречного сегмента. С этой целью и для отработки дальнейшей методики исследования спектральных особенностей МСО были получены следующие спектры: опорных звезд (Капеллы и Полярной), вечернего и утрен-

него Солнца при разных зенитных массах, чистого участка неба на разных высотах над горизонтом, отдельных полей кучевых и перистых облаков. По спектрам вечернего и утреннего Солнца при зенитных углах $77-87^{\circ}$ были определены коэффициенты пропускания атмосферы в районе Петропавловска для больших зенитных масс и вычислен внеатмосферный спектр Солнца.

На рисунке 2 представлены регистрограммы спектров сумеречного сегмента в диапазоне зе-

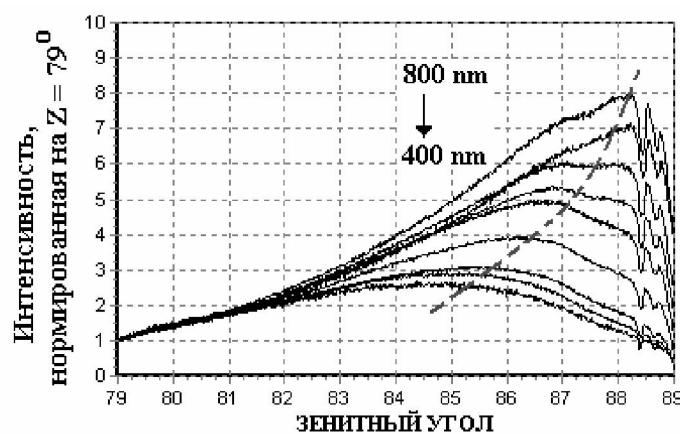
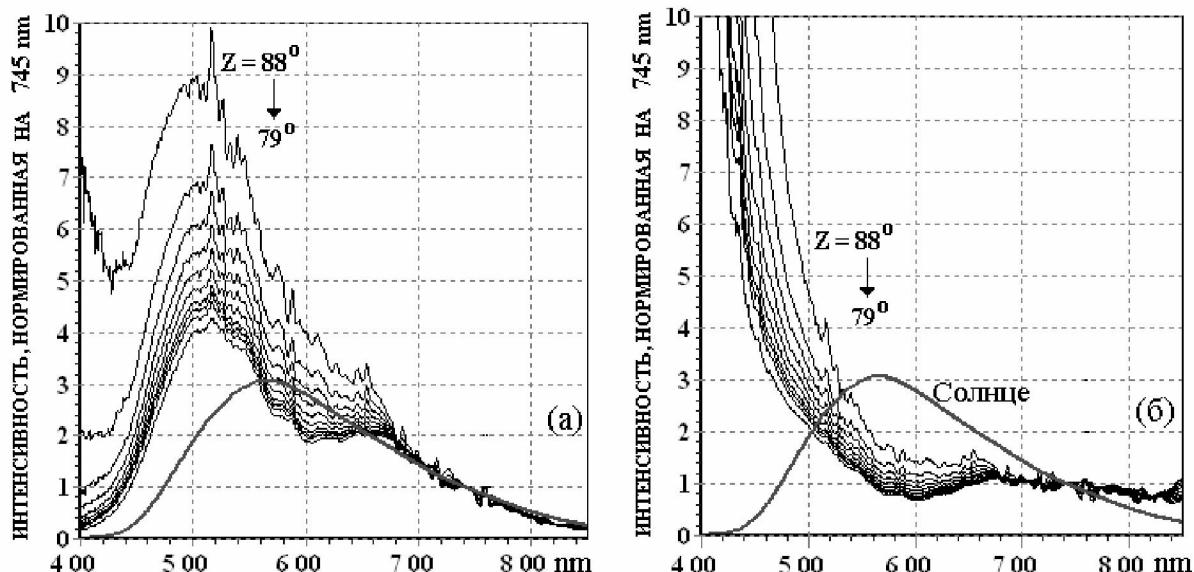


Рис. 3. Вертикальные профили яркости сумеречного сегмента в л 400-800 нм

Рис. 4. Спектры сумеречного сегмента, исправленные за M_z (а) и деленные на спектр Солнца (б). Использована формула В.Г.Розенберга

нитных углов от $Z=79^{\circ}$ (верхняя кривая) до $Z=88^{\circ}$ (нижняя кривая) при зенитном расстоянии Солнца $Z_c = 98^{\circ}$, а также регистрограммы спектров дневного неба для $Z = 54^{\circ} - 68^{\circ}$.

Регистрограммы для $Z = 89^{\circ}$ и 90° не приводятся ввиду тонкого слоя пыли вблизи горизонта, хорошо заметного на соответствующих цветных фотографиях. Нижняя часть спектрограммы в пределах 1° отводилась для регистрации линии горизонта, необходимой для уверенного отождествления зенитных углов исследуемых участков спектрограммы. Хорошо заметно, как от зенитного угла меняется спектральное распределение яркости, определяя цветовую гамму сумеречного сегмента.

На рисунке 3 представлены вертикальные профили яркости того же сумеречного сегмента в различных л: от 425 до 800 нм. Отчетливо прослеживается вертикальное смещение максимума яркости в зависимости от л (пунктир).

Яркость и цвет наблюдаемого участка сумеречного сегмента во многом определяются зенитным и азимутальным положением Солнца, степенью запыленности атмосферы, а также большим диапазоном воздушных масс вблизи горизонта. Для учета последнего фактора первоначально нами были использованы функция Бемпорада и формула В.Г. Розенberга [3]:

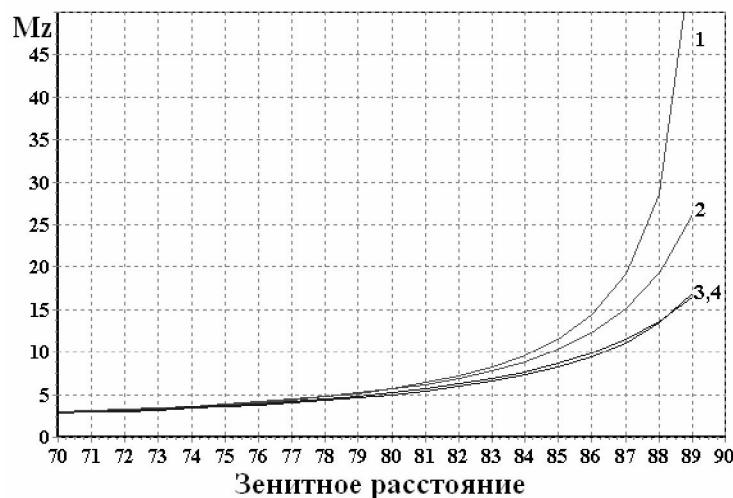


Рис. 5. Зависимость воздушных масс M_z от угла визирования Z . 1 – Sec z ,
2 – по Бемпораду и формуле Розенберга, 3,4 – по формулам (1) и (2)

$$M_z = (\cos z + 0.025 \exp(-11 \cos z))^{-1},$$

хорошо описывающие зависимость воздушных масс от угла визирования Z с учетом явления рефракции вблизи горизонта для случая прямых проходящих лучей внеатмосферных объектов, таких как звезда. Однако для сумеречного сегмента, где мы имеем дело в основном с рассеянным светом, результат привел к перекомпенсации влияния воздушных масс, что отражено на рисунке 4. Спектры для $Z = 79^\circ$ и 88° поменялись местами.

В результате для сумеречного сегмента В.Д. Вдовиченко предложил две эмпирические формулы (1) и (2), приведенные ниже, благодаря которым, при определенных значениях коэффициентов, спектры сумеречного сегмента практически совпадают. Соответствующее изменение этих коэффициентов приводит к зависимости $M(Z)$, рассчитанной по формуле В.Г. Розенберга.

$$M_z = 1/(\cos(Z) + m * k^{(90-Z)}) \quad (1)$$

где $m = 0.044$ и $k = 0.95$.

При $k=0.62$ формула (1) дает значения M_z , практически совпадающие с результатами расчетов по формуле Розенберга.

$$M_z = 1/(\cos(Z) - m * k^{(90-Z)}) \quad (2)$$

где $m = 2.75$ и $k = 0.90$.

При $k = 0.60$ формула (2) дает также значения M_z , практически совпадающие с результатами расчетов по формуле Розенберга.

Коэффициенты $m = 0.44$ в формуле (1) и $m = 2.75$ в (2) также могут меняться, что делает эти формулы еще более гибкими для подбора зависи-

симости воздушных масс от угла визирования для каждого конкретного случая наблюдения.

Следует обратить внимание на то, что расчет зенитных масс и по табличным данным Бемпорада, и по формуле Розенберга, и по нашим двум формулам (особенно по (2)) равносителен незначительной добавке Dz к Z . Эта добавка быстро убывает с уменьшением зенитного угла по степенному закону, стремясь к нулю уже при $Z = 60^\circ$. Согласно формулам Бемпорада и Розенберга, эта добавка объясняется смещением угла визирования на $\sim 1^\circ$ от истинного положения внеатмосферного светила вблизи горизонта за счет атмосферной рефракции. Что касается сумеречного сегмента, то его цвет и яркость после захода Солнца обусловлены, в основном, эффектами рассеяния, и добавка к Z вблизи горизонта уже составляет чуть больше 2° , что и учитывается в наших формулах.

Результат учета воздушных масс в спектрах сумеречного сегмента по нашим формулам представлен на рисунке 6.

Видим, что все спектры от $Z=79^\circ$ до 88° практически слились друг с другом. Более того, из рисунка 6 ясствует, что во всех спектрах сумеречного сегмента, вынесенных за атмосферу, присутствует хорошо выраженная полоса поглощения озона (Шаппюи), интенсивность которой не зависит от воздушных масс. Этот факт дает основание предполагать, что для правильного учета поглощения озона в области полос Шаппюи нужно рассматривать несколько иную геометрию, ограниченную весьма тонким озоновым слоем.

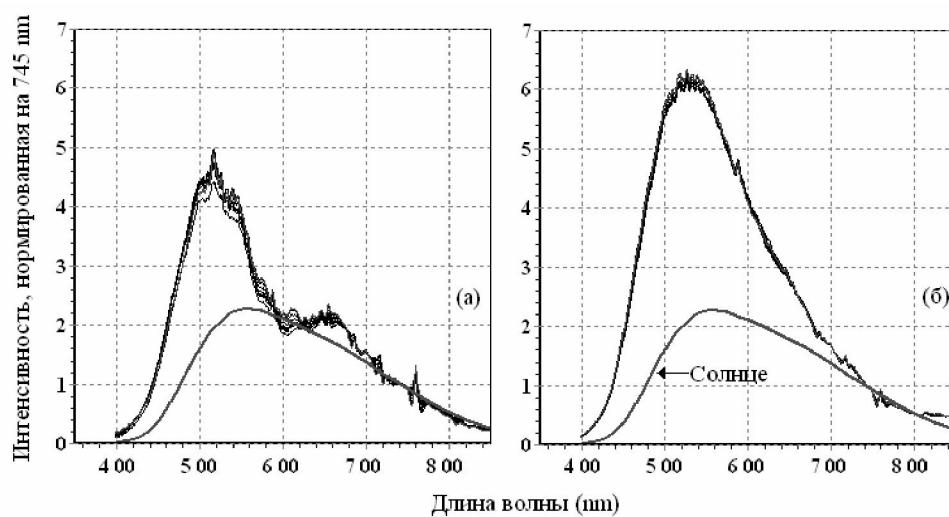


Рис. 6. Спектры сумеречного сегмента (а), дневного неба (б) и Солнца, исправленные за M_z по формулам (1) и (2), т.е. вынесенные за атмосферу

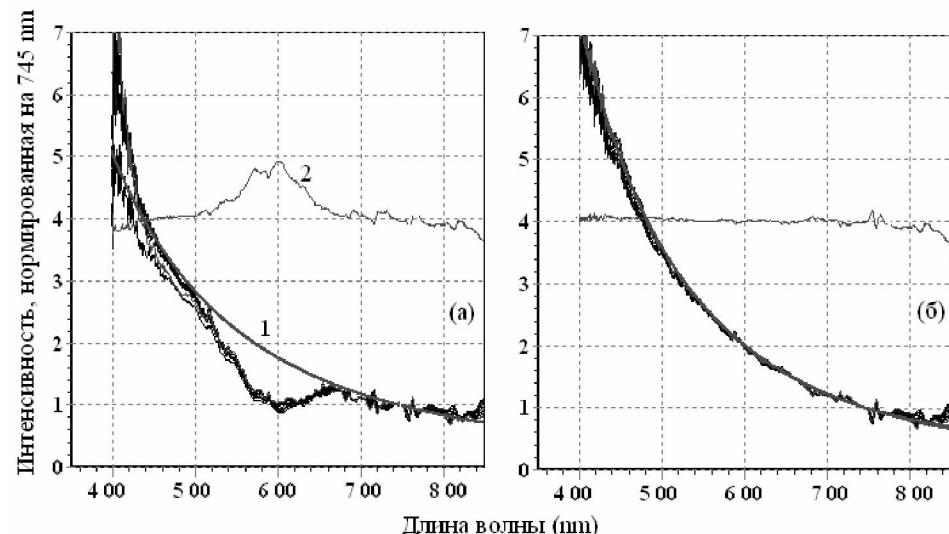


Рис. 7. Спектры сумеречного сегмента (а) и дневного неба (б), исправленные за M_z по формулам (1) и (2), и деленные на Солнце. 1 – Зависимость $I \sim l^{-2.45}$, 2 – Отношение кривой 1 к спектрам сумеречного сегмента (полосы Шаппюи). Кривая 2 сдвинута по вертикали вверх на 3 единицы.

На рисунке 7 представлены внеатмосферные спектры сумеречного сегмента и дневного неба, отнесенные к соответствующему спектру Солнца.

Кривая 1, выражает зависимость яркости рассеянного света (I) от l^n . Для данной даты параметр $n = 2.45$, что, возможно, указывает на ощущенный вклад аэрозольного рассеяния по сравнению с рэлеевским, когда $I \sim l^{-4}$. Для дневного неба хорошее согласие наблюдается при $n = 3.2$. Это наводит на мысль, что при соблюдении определенных условий стандартизации и калибровки результатов наблюдений, контролируемых значениями коэффициентов m и k в формулах (1)

или (2), и показателя степени n (см зависимость 1 рис. 7 (а)), данный метод можно использовать для контроля содержания аэрозоля в атмосфере.

Работа выполнена в рамках ПФИ, шифр Ф-0351.

ЛИТЕРАТУРА

- Гришин Н. И. Исследование непрерывного спектра серебристых облаков // Бюлл. ВАГО 1956. № 19(26). С. 3-16.
- Васильев О. Б. Астрофизические исследования серебристых облаков. Астросовет АН СССР. 1967.
- Розенберг Г. В. Сумерки. Гос. изд-во физ-мат. литературы. М. 1963. 380 с.

Резюме

Қазақстан Республикасының мемлекеттік ғарыштық бағдарламасы шенберінде Петропавл қаласында В.Г.Фесенков атындағы Астрофизика институттың Ай мен планета физика лабораториясының қызметкерлері 2006-2007 жылдарында өткізілген мезосфералық күмістей бұлттардың спектрлік бақылауларының өндөу процесінде қаралытқан аспан аясын есепке алуға өте күрделі мәселе пайдада болғанында, оны авторлар, ең ақырында, өз бетімен тылыми мәселе ретінде қарастыруға мәжбүр етеді. Бұл мақалада өткізілген зерттеудің алғашқы нәтижелері берілді.

Summary

During processing the Noctilucent clouds (NLC) spectra obtained in 2006-2007 in Petropavlovsk (North Kazakhstan) by the Laboratory of physics of the Moon and planets of the Astrophysical Institute after V. G. Fessenkov (on the Space Program of Kazakhstan), a rather difficult problem has appeared. That is canceling the spectra of the twilight sky from the NLC ones. The authors consider this problem as an independent scientific one. The first results of this consideration are presented in the article.

*Астрофизический институт
им. В.Г. Фесенкова МОН РК
г. Алматы*

Поступила 20.04.2009 г.