

В.Е. Павлов, Л.А. Егорова

## О ВЫБОРЕ СПЕКТРАЛЬНОГО УЧАСТКА В ЗАДАЧАХ СУМЕРЕЧНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

На основе измерений спектров солнечной радиации в видимой и близкой ИК областях вблизи линии горизонта определены участки с минимальной газовой абсорбцией. Они могут быть использованы для сумеречного зондирования атмосферы.

Развитие методов решения уравнения переноса лучистой энергии в дисперсных средах со сложной геометрией в последние годы создало серьезные предпосылки для количественного анализа результатов наблюдений яркости и поляризации сумеречного неба в целях изучения оптических свойств атмосферного аэрозоля на разных уровнях. Весьма перспективным в этом отношении представляется метод Монте-Карло [1–3]. Однако при математическом моделировании процессов рассеяния света, формирующих поля нисходящей и восходящей радиации, исследователь сталкивается с необходимостью задания целого ряда трудноопределяемых оптических параметров. Существенные неопределенности возникают при задании высотных профилей функций пропускания атмосферных газов в каждой конкретной ситуации. Дело в том, что даже слабые полосы поглощения, с трудом обнаруживаемые днем, например, обычным способом Бугера при малых атмосферных массах, из-за больших путей луча в атмосфере в сумеречных условиях могут оказывать вполне заметное влияние на зависимость яркости сумеречного неба от зенитного расстояния Солнца. А именно эта зависимость берется за основу в решении обратных задач. Следовательно, возникает проблема поиска таких спектральных участков, где роль молекулярной абсорбции в общем ослаблении света отсутствует или хотя бы сводится к минимуму.

При выборе спектральной области для сумеречного зондирования необходимо иметь в виду следующие обстоятельства. Во-первых, эффективный сумеречный слой тем уже, чем короче длина волн  $\lambda$  [4]. Но погоня за локализацией свечения по высоте путем уменьшения  $\lambda$  явно не состоятельна, поскольку в этом случае резко возрастает вклад молекулярного и многократного рассеяния в наблюдаемую яркость, а основная цель зондирования — получение сведений об аэрозольной компоненте. В связи с вышесказанным, в сумеречных исследованиях вряд ли целесообразно использование области  $\lambda < 0,45$  мкм. Во-вторых, для зондирования оказывается практически непригодной инфракрасная область спектра  $\lambda > 1,3$  мкм вследствие малости рассеянных световых потоков и трудности их регистрации из-за отсутствия высокочувствительных светоприемников, а также по причине перекрытия длинноволновых «окон прозрачности» крыльями полос поглощения атмосферных газов [5]. В настоящей работе осуществлен поиск спектральных участков в диапазоне длин волн  $0,45 \div 1,3$  мкм, свободных от газового поглощения в условиях сумерек.

Как известно, при формировании поля яркости сумеречного неба максимальное ослабление испытывает проходящий через атмосферу солнечный луч с нулевой высотой перигея, т.е. скользящий вдоль поверхности Земли. Воспользовавшись этим обстоятельством, мы выполнили спектральные измерения интенсивности прямой солнечной радиации на разных зенитных расстояниях  $z_0$  вплоть до  $z_0 = 90^\circ$ , что допускала специфика расположения пункта наблюдений. Подобный эксперимент в сочетании с просмотром атласа солнечных линий [6] позволил обнаружить весьма слабые селективные полосы поглощения и идентифицировать границы спектральных участков с пренебрежимо малой абсорбцией атмосферных газов.

Измеритель атмосферной прозрачности был сконструирован на базе двойного призмного монохроматора ДМР-4 со сменными фотоумножителями на видимую и инфракрасную области спектра. Телесный угол прибора задавался фокусным расстоянием объектива и геометрическими параметрами диафрагмированной горизонтально расположенной входной щели и составлял  $32' \times 32''$ . Измеритель смонтирован на параллактической установке, позволяющей при незначительных коррекциях получать устойчивое изображение солнечного диска на входной щели монохроматора. Поскольку изменение световых потоков от момента кульминации Солнца до его приближения к линии горизонта превышало 4 порядка, была предусмотрена возможность диафрагмирования объектива. Ослабление света диафрагмами контролировалось фотометрическим путем. Спектральная ширина щели, с которой проводились записи солнечных спектров, в области  $0,63$  мкм составляла около  $1,3 \cdot 10^{-3}$  мкм.

Анализ полученных спектрограмм показал следующее. При умеренном спектральном разрешении взаимно перекрывающиеся фраунгоферовы и теллурические линии образуют на спектрограммах специфические крупномасштабные образования, хорошо видимые на рис. 1, 2. В случае отсутствия поглощения или его пренебрежимо малости такие образования шириной  $2 \div 3 \times 10^{-3}$  мкм вследствие незначительности занимаемого ими спектрального интервала сохраняют свою конфигурацию с изменением

зенитного расстояния Солнца вплоть до  $z_0 = 90^\circ$ . Наличие же молекулярного поглощения, роль которого быстро растет с ростом  $z_0$ , как правило, приводит к сильным трансформациям этих образований. Причем могут быть обнаружены как появление новых структурных образований, так и сильная деформация ранее существовавших при малых  $z_0$ .

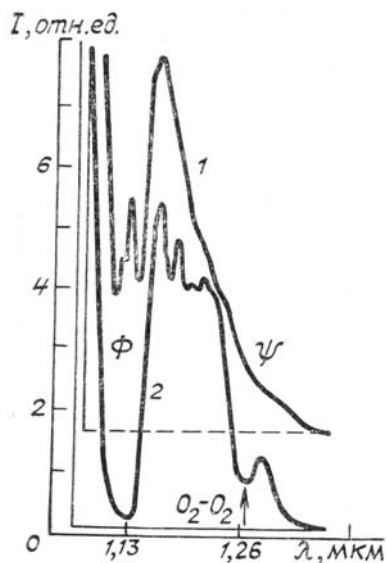


Рис. 1. Спектрограммы солнечной радиации в области 1,1÷1,3 мкм при  $z_0 = 72,5^\circ$  (1) и  $88^\circ$  (2). Пунктиром указан нулевой уровень сигнала для 1

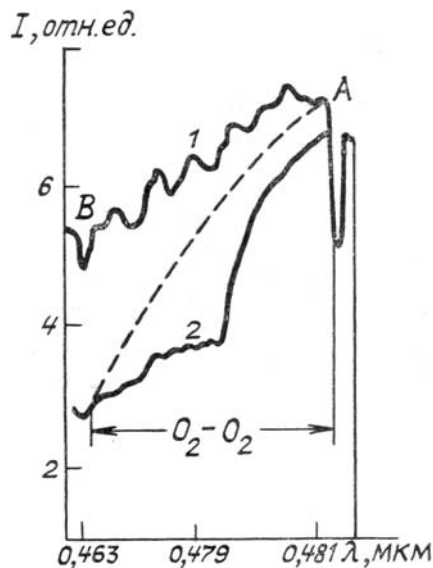


Рис. 2. Спектры Солнца в синей области при  $z_0 = 70^\circ$  (1) и  $90^\circ$  (2). Пунктиром указана зона поглощения  $O_2 - O_2$

Примером тому могут служить записи спектров «окна прозрачности» 1,15÷1,30 мкм между полосами  $\Phi$  и  $\Psi$  водяного пара, представленные на рис. 1. Весьма гладкий спектр при  $z_0 = 72,5^\circ$  ( $z_0$  — видимое зенитное расстояние центра солнечного диска) с ростом  $z_0$  до  $88^\circ$  из-за влияния поглощения света в крыльях полос становится в существенной степени изрезанным, а в области 1,26 мкм проявляется полоса поглощения, приписываемая короткоживущему молекулярному комплексу кислорода  $O_2 - O_2$  [7]. На рис. 2 приведены записи солнечных спектров в области 0,46÷0,49 мкм при  $z_0 = 70^\circ$  и  $89,9^\circ$ . Заметное убывание интенсивности  $I$  для  $z_0 = 89,9^\circ$  с уменьшением  $\lambda$  обусловлено рэлеевским рассеянием. Спектрограммы совмещены по длинноволновому крылу фраунгоферовой линии  $A$ , которое, как и контур фраунгоферовой линии  $B$ , не зависят от  $z_0$ . В интервале между  $A$  и  $B$  отчетливо видно размывание крупномасштабных структур, обязанное присутствию полосы поглощения  $O_2 - O_2$  [7]. Дос- таточно надежно отождествляются границы полосы, изображенные вертикальными линиями.

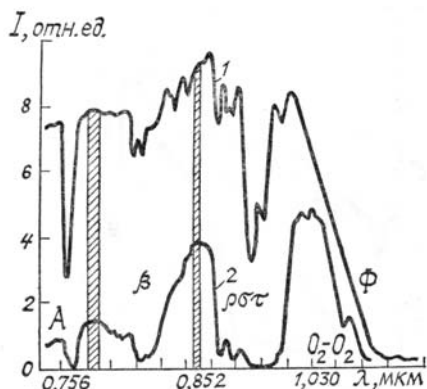


Рис. 3. Спектрограммы солнечного света в близкой ИК области при  $z_0 = 71^\circ$  (1) и  $90^\circ$  (2)

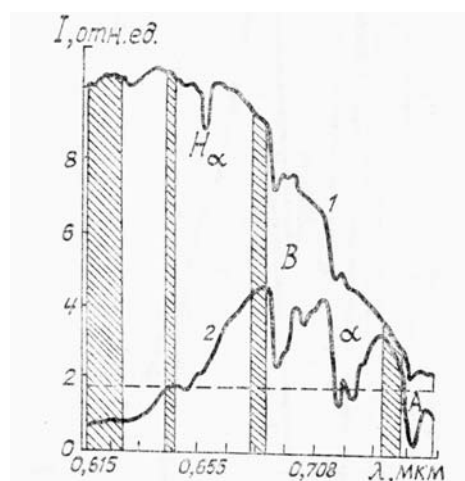


Рис. 4. То же, что на рис. 3, в красной области при  $z_0 = 65^\circ$  (1) и  $90^\circ$  (2). Нулевой уровень сигнала для (1) изображен пунктиром

На рис. 3 представлены спектрограммы солнечной радиации в близкой инфракрасной области при  $z_0 = 71^\circ$  и  $90^\circ$ . «Окно прозрачности» между полосами водяного пара  $\rho\sigma\tau$  и  $\Phi$  с увеличением  $z_0$

оказывается заметно деформированным молекулярным поглощением. В области спектра 1,06 мкм появляется полоса поглощения комплекса  $O_2-O_2$  [7]. Существенно углубляются и уширяются полосы  $\rho\sigma$  и  $\beta$  водяного пара и полоса  $A$  молекулярного кислорода. Анализ приводимых на рис. 1, 3 спектрограмм показывает, что в области 0,75–1,3 мкм существуют лишь два узких спектральных участка  $0,856\pm 0,003$  и  $0,776\pm 0,004$  мкм, где роль молекулярного поглощения в ослаблении света незначительна. Эти зоны минимальной газовой абсорбции заштрихованы.

Аналогичные записи солнечных спектров в красной области приведены на рис. 4. Отчетливо видно, в какой мере поглощение света водяным паром деформирует линию  $H_\alpha$ , и как кислородная абсорбция искажает фраунгоферов спектр в районе 0,628 мкм. В заштрихованных зонах  $0,751\pm 0,007$ ,  $0,631\pm 0,005$ ,  $0,642\pm 0,003$  и  $0,611\pm 0,11$  роль молекулярного поглощения пренебрежимо мала.

Подобные же трансформации крупномасштабных образований при больших  $z_0$ , связанные с поглощением, обнаруживаются в спектральном участке 0,57–0,30 мкм. В частности, сильно деформируется контур дублета солнечного натрия. В более коротковолновой области  $0,45 < \lambda < 0,57$  мкм, помимо полосы на рис. 2, зон заметного молекулярного поглощения нами не найдено. Однако последнее вовсе не означает, что в этом участке, как и вообще во всех заштрихованных зонах на рис. 3–4, вероятность выживания кванта в расчетах яркости сумерек может быть принята равной 1. Во-первых, практически вся видимая область спектра перекрыта слабой диффузной полосой озонного поглощения (полоса Шапшюи) с максимумом около 0,6 мкм. И во-вторых, во всех ситуациях имеет место поглощение радиации атмосферным аэрозолем.

Из-за того, что яркость сумеречного неба мала, большинство исследователей осуществляют выделение рабочих спектральных интервалов с помощью интерференционных светофильтров с достаточно широкими полосами пропускания. Однако их выбор, как правило, не связывается со структурой полос молекулярного поглощения. Типичным примером могут служить измерения К.Л. Коулсона в спектральных участках с максимумами при 0,7, 0,8 и 0,9 мкм [8], попадающими в абсорбционные полосы кислорода и водяного пара (рис. 3, 4). Эти обстоятельства определили необходимость выполнения настоящей работы.

1. Кондратьев К.Я., Марчук Г.И., Бузников А.А., Минин И.Н., Михайлов Г.А., Орлов В.М., Смоктий О.И. Поле излучения сферической атмосферы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. 214 с.
2. Назаралиев М.А., Розенберг Г.В. //Изв. АН СССР. ФАО. 1977. Т. 13. № 2. С. 133–143.
3. Назаралиев М.А., Павлов В.Е. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 4. С. 19–24.
4. Розенберг Г.В. Сумерки. М.: Физматгиз. 1963. 370 с.
5. Зуев В.Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. М.: Сов. радио. 1966. 318 с.
6. Moore С.Е., Minnaert M.G.J., Houtgast J. The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å. Washington: UNESCO. 1966. 340 p.
7. Дианов-Клоков В.И. //Оптика и спектроскопия. 1966. Т. 20. Вып. 6. С. 954–962.
8. Coulson K.L. //Appl. Optics. V. 19. № 3469–3480.

Астрофизический институт  
АН КазССР, Алма-Ата

Поступила в редакцию  
29 августа 1988 г.

V. E. Pavlov, L. A. Egorova. **On the choice of the Spectral Intervals for the twilight Atmospheric Sounding.**

Solar spectrum measurements, with the sun located not far from the terrestrial horizon, have been used to determine visible and near IR spectral intervals with minimum gas absorption. These intervals seem to be appropriate for atmospheric sounding in the twilight.