

Н. И. КОЖЕВНИКОВ, Е. А. МАКАРОВА, Г. Ф. СИТНИК

ПОГЛОЩЕНИЕ РАДИАЦИИ СОЛНЦА ПАРАМИ ВОДЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА РАЗНЫХ ВЫСОТАХ

Приводятся результаты наблюдений теллурических полос водяного пара в спектре Солнца. Указывается, что калибровочная кривая, построенная по наблюдениям на высоте 3000 м, отличается от калибровочной кривой, построенной по наблюдениям на малых высотах.

В период проведения Международного геофизического года в Кучинской астрофизической обсерватории и в Высокогорной станции ГАИШ под Алма-Атой была осуществлена серия наблюдений теллурических линий в спектре Солнца. Исследовалось поглощение солнечной радиации водяными парами и кислородом; с этой целью использовались инфракрасные спектрографы ИКС-6 и ИКС-11. Результаты этого исследования в части, касающейся получения калибровочной кривой для водяного пара и влияния паров воды на оптические свойства земной атмосферы, изложены в статьях [1, 2]. В настоящей статье рассматривается вопрос о различии между калибровочной кривой, полученной нами для паров воды на основе аэрологических данных и кривой, приведенной в работе Фоуля [3, 4].

На рис. 1 представлены калибровочные кривые для определения содержания количества (в сантиметрах осажденной воды) водяного пара в атмосфере. По оси абсцисс отложено количество m водяного пара (в сантиметрах осажденной воды), по оси ординат — минимальная остаточная интенсивность $I_{nn}/I_{н.с}$ спектра в полосе поглощения $\lambda 1,13 \mu$ (I_{nn} — минимальная интенсивность в полосе, $I_{н.с}$ — интенсивность непрерывного спектра). Кривая a построена по данным наших измерений на Высокогорной станции ГАИШ в Алма-Ате [1], кривая b построена по данным Фоуля [3]. При построении кривой a , разрешающая сила спектрографа ИКС-6 была приведена к разрешающей силе инструмента, использованного Фоулем. Как видно из рис. 1, различие между кривыми a и b значительно, оно нуждается в объяснении. Рассмотрим возможные инструментальные ошибки и погрешности методики наблюдений и обработки, и то влияние, которое они могут оказать на результаты построения калибровочной кривой.

При обработке спектрограммы, полученной на инфракрасном спектрометре типа ИКС-6, большое значение имеет, во-первых, правильное проведение линии, соответствующей непрерывному спектру в

области, занятой полосой поглощения, во-вторых, установление нулевой линии записи и учет рассеянного света в спектрографе. Образец записи с нанесенной нулевой линией и линией непрерывного спектра дан на рис. 2 (запись получена на спектрографе ИКС-6 24 августа 1958 г.). При проведении линии непрерывного спектра мы пользовались

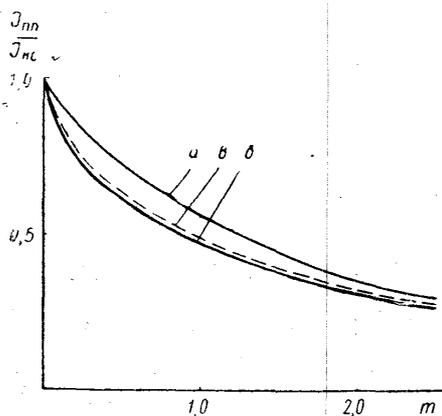


Рис. 1

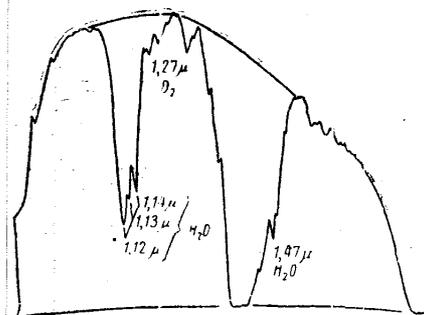


Рис. 2

методикой, соответствующей методике Фоуля [3]. Аппроксимационная кривая проводилась по максимумам ближайших участков непрерывного спектра. Дисперсия нашего спектрографа (ИКС-6) больше, нежели дисперсия инструмента, использованного Фоулем. Поэтому (в нашем случае) ошибка (возникающая из-за неточного установления линии непрерывного спектра) будет заключаться в уменьшении, а не в увеличении остаточной интенсивности. Таким образом, маловероятно то, что различие между кривыми *a* и *b* рис. 1 возникло в результате неправильного определения линии непрерывного спектра.

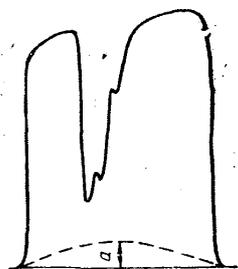


Рис. 3

Более сложен вопрос об учете рассеянного света в спектрографе и о правильном проведении нулевой линии на спектрограмме. Не касаясь самой методики этой процедуры (описанной в [1]), оценим насколько правильным было установление нулевой линии на записи спектра. Пусть \bar{I}^1 есть остаточная интенсивность, измеренная на спектрограмме с ошибочно проведенной нулевой линией; \bar{I} — истинная остаточная интенсивность; *a* — ошибка в положении нулевой линии, выраженная в долях истинной интенсивности непрерывного спектра (рис. 3). Легко установить, что между \bar{I}^1 и \bar{I} существует следующая зависимость:

$$\bar{I}^1 = \bar{I} \frac{1}{1+a} + \frac{a}{1+a}. \quad (1)$$

Как показывает опыт, зависимость минимальной остаточной интенсивности в полосе поглощения от количества вещества *m*, поглощающего радиацию, может быть в первом приближении описана экспоненциальной функцией

$$\bar{I} = e^{-km}, \quad (2)$$

где *k* есть коэффициент поглощения.

Пусть мы имеем две полосы поглощения, центрированные на λ_1 и λ_2 ; величина a может быть различна для этих двух полос. Тогда, используя (1) и (2), для остаточной интенсивности в полосах (λ_1) и (λ_2) получаем следующие выражения:

$$\bar{T}_1^1 = \frac{e^{-k_1 m}}{1 + a_1} + \frac{a_1}{1 + a_1}, \quad \bar{T}_2^1 = \frac{e^{-k_2 m}}{1 + a_2} + \frac{a_2}{1 + a_2}. \quad (3)$$

Выражая \bar{T}_2^1 через \bar{T}_1^1 , получаем

$$\bar{T}_2^1 = \frac{1}{1 + a_2} \left(\bar{T}_1^1 - \frac{a_1}{1 + a_1} \right)^{k_2/k_1} (1 + a_1)^{k_2/k_1} + \frac{a_2}{1 + a_2}. \quad (4)$$

Если нулевая линия проведена правильно, то $a_1 = a_2 = 0$ и

$$\bar{T}_2^1 = (\bar{T}_1^1)^{k_2/k_1}. \quad (5)$$

Соотношение (5) мы используем в качестве критерия правильности установления нулевой линии. Для этого построим график, по оси абсцисс которого будем откладывать величины $(\bar{T}_1^1)^{k_2/k_1}$, а по оси ординат — величины \bar{T}_2^1 . Тогда, если нулевая линия проведена правильно, мы должны получить прямую линию, являющуюся биссектрисой координатного угла. Во всех других случаях график зависимости \bar{T}_2^1 от $(\bar{T}_1^1)^{k_2/k_1}$ не является прямой линией, проходящей через начало координат. Величину k_2/k_1 мы можем определить следующим образом. Построим график, по оси абсцисс которого отложены величины \bar{T}_1^1 , а по оси ординат \bar{T}_2^1 . Тогда тангенс угла наклона линии графика к оси абсцисс в точке (1,1) дает величину отношения k_2/k_1 . Действительно, дифференцируя \bar{T}_2^1 по \bar{T}_1^1 , получаем из [4]

$$\frac{d\bar{T}_2^1}{d\bar{T}_1^1} = \frac{k_2}{k_1} \left(\bar{T}_1^1 - \frac{a_1}{1 + a_1} \right)^{\frac{k_2}{k_1} - 1} \frac{(1 + a)^{k_2/k_1}}{1 + a_2}. \quad (6)$$

При $\bar{T}_2^1 = \bar{T}_1^1 = 1$ и $a_1 = a_2$ формула (6) принимает такой вид:

$$\frac{d\bar{T}_2^1}{d\bar{T}_1^1} = \frac{k_2}{k_1}. \quad (7)$$

Этот метод был применен нами для полос поглощения Φ ($\lambda = 1,3 \mu$) и Ψ^1 ($\lambda = 1,47 \mu$), которые использовались также Фоулем. Фоуль [4] строил график, по оси абсцисс которого откладывалась величина \bar{T}_1^1 (для $\lambda 1,13 \mu$), а по оси ординат — величины \bar{T}_2^1 (для $\lambda 1,47 \mu$). На рис. 4 показан этот график; крестиками отмечены данные Фоуля, кружками — наши данные: через эти точки проведена прямая линия, которая, как это следует из (3), проходит через точку (1,1). Однако метод Фоуля не дает возможности определить правильность проведения нулевой линии. На рис. 5 представлены результаты применения нашей методики; исходные данные брались из рис. 4. По оси абсцисс на рис. 5 отложена величина $[I(\Phi)]^{k_2/k_1}$, по оси ординат — величина $I(\Psi^1)$; показатель степени k_2/k_1 определялся с помощью графика рис. 4. Как видно из рис. 5, точки графика хорошо ложатся на прямую, проходя-

щую через начало координат. Следовательно, проведение нулевой линии (и учет рассеянного света) как нами, так и Фоулем произведены правильно.

Рассмотрим возможные причины различия между нашей калибровочной кривой и Фоуля. Фоуль производил калибровку в лабораторных условиях; при этом давление и температура газов на пути свето-

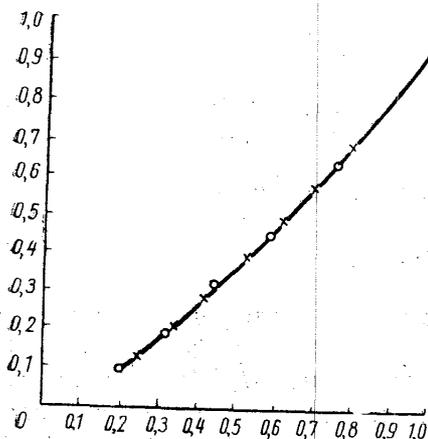


Рис. 4

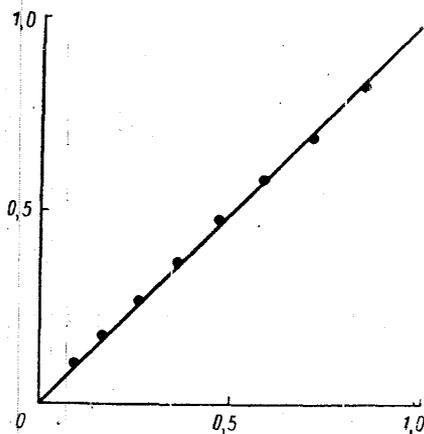


Рис. 5

вого луча оставались примерно постоянными и равными 760 мм рт. ст. и $+20^\circ$. Высокогорная станция ГАИШ расположена на высоте 3000 м; луч Солнца на его пути до спектрографа пересекает слои атмосферы с различной температурой и давлением. Как известно [5, 6], полуширина линий поглощения водяного пара зависит от температуры и давления окружающего газа. Согласно [6], полуширина α линий поглощения водяного пара может быть представлена следующей эмпирической формулой:

$$\alpha = \alpha_0 \sqrt{\frac{P}{P_0}} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (8)$$

Здесь α_0 обозначает полуширину, соответствующую некоторым нормальным значениям температуры T_0 и давления P_0 . Величина P есть давление атмосферы на уровне наблюдения; величиной парциального давления водяного пара можно пренебречь. Поскольку с увеличением высоты места наблюдения давление P уменьшается, то уменьшается и полуширина α . Следовательно, при одном и том же количестве t водяного пара, поглощение радиации в полосе будет меньше. Калибровочная кривая, построенная на высоте h_2 , должна идти выше калибровочной кривой, построенной на высоте h_1 ... ($h_1 < h_2$). Таким образом, с качественной стороны различие между кривыми а и б рис. 1 получает свое объяснение.

Оценим изменение полуширины α при переходе от наблюдений на высоте H_1 (соответствующей калибровочной кривой, построенной в лабораторных условиях при атмосферном давлении 760 мм рт. ст.) к наблюдениям на высоте H_2 (3000 м). Это изменение мы определим исходя из сопоставления калибровочных кривых, полученных нами и Фоулем, и формулы (8). Совпадение оценок изменения α , полученных этими двумя методами, показывает законность применения форму-

лы (8) и реальность расхождения калибровочных кривых. Для использования формулы (8) необходимо знать, что мы понимаем под величиной давления P в месте наблюдения. Это не может быть просто давлением атмосферы на высоте H , поскольку водяные пары расположены по всей толще атмосферы и находятся в различных условиях. В качестве давления мы будем использовать величину приведенного давления $P_{пр}$, определив ее следующим образом:

$$P_{пр} = \frac{\int_H^{\infty} \rho(h)P(h)dh}{\int_H^{\infty} \rho(h)dh}, \quad (9)$$

где $P(h)$ — давление атмосферы на высоте h ; $\rho(h)$ — абсолютная влажность на высоте h . Определение $P_{пр}$ в форме (9) совпадает с определением, данным в работе [7]. Зависимость $\rho(h)$ бралась в виде

$$\rho(h) = \rho(0)e^{-\frac{z}{8,6}}, \quad (10)$$

где z выражено в километрах [8]. Результаты подсчетов показали, что величина $P_{пр} = 350$ мм рт. ст. на Высокогорной станции ГАИШ (высота 3000 м). Как уже упоминалось, Фоуль производил калибровку в лабораторных условиях (давление 760 мм рт. ст., температура порядка $+20^\circ$), мы — на Высокогорной станции (давление 350 мм рт. ст., температура -22°). Исходя из этих данных для отношения полуширин α находим величину

$$\frac{\alpha(H_2)}{\alpha(H_1)} = 0,74. \quad (11)$$

Из-за сравнительно малой дисперсии спектрографа ИКС-6 запись спектра полосы поглощения радиации парами воды не разделяется на отдельные линии. Поэтому для оценки изменения α необходимо привлечь ту или иную модель полосы поглощения. Это даст нам возможность связать величину α с измеряемым нами интегральным поглощением в определенной области полосы. Поскольку количество водяного пара на рассматриваемом участке калибровочной кривой не превышает 3 см осажденной воды, то с достаточной степенью точности можно использовать модель полосы поглощения, предложенную Эльзассером [6, 10]. Мы рассмотрим оба предельных случая этой модели: 1) линии поглощения расположены на расстоянии, не превышающем учетверенную полуширину α ; 2) расстояние между линиями превышает величину 15α . В первом случае остаточная интенсивность \bar{I} дается формулой:

$$\bar{I} = e^{-c_1 \alpha m}, \quad (12)$$

где α — полуширина линии поглощения, m — количество поглощающего вещества, c_1 — некоторый параметр, не зависящий от α и m . Во втором случае величина \bar{I} выражается следующим образом:

$$\bar{I} = 1 - \Phi(c_2 \alpha \sqrt{m}), \quad (13)$$

где α , m , c_2 имеют тот же смысл, что и выше. Функция $\Phi(z)$ есть функция Крампа:

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx. \quad (14)$$

Из формул (12) и (13) следует, что для одного и того же значения m , остаточные интенсивности \bar{I} зависят только от α . Обозначая величины аргументов в формулах (12) и (13) через u_1 и u_2 соответственно получаем

$$\frac{\alpha(H_2)}{\alpha(H_1)} = \frac{u_1(H_2)}{u_1(H_1)}, \quad \frac{\alpha(H_2)}{\alpha(H_1)} = \frac{u_2(H_2)}{u_2(H_1)}. \quad (15)$$

Подсчет отношения полуширин α для нескольких значений величины m и представления калибровочной кривой формулой (12) дал величину $0,78 \pm 0,10$. Для случая представления калибровочной кривой формулой (13) получена величина $0,79 \pm 0,10$. Таким образом, величины отношения полуширин α для высот H_1 и H_2 , определенные теоретически (по формуле (8)) и экспериментально (по соотношению (15)), достаточно близки друг к другу. Отсюда следует, что полуширина α линий поглощения спектра паров воды изменяется пропорционально корню квадратному из величины давления окружающей атмосферы. Это следствие находится в согласии с указаниями [6] и [10].

Таким образом, калибровочная кривая, построенная нами, правильно отражает особенности поглощения радиации парами воды. Кривая Фоуля, построенная в лабораторных условиях, при атмосферном давлении 760 мм рт. ст., не может применяться при наблюдениях, производимых на высотах порядка 2—3 км и выше. Недостаточность наблюдений Фоуля, произведенных в специфических условиях, отмечается рядом авторов (например, [9]). Как видно из рис. 1, использование кривой Фоуля для определения содержания водяного пара на высотах порядка 3000 м может дать ошибку, достигающую 100% от измеряемой величины. Поэтому ввиду трудности построения как теоретической модели полосы поглощения радиации парами воды, так и создания в лаборатории условий, соответствующих имеющимся в атмосфере, лучшим способом определения калибровочной кривой является, по-видимому, использование аэрологических данных (это отмечено также в [1, 2]).

Чтобы оценить границы применимости калибровочной кривой Фоуля, мы построили теоретическую кривую для высоты Кучино ($H=200$ м). Процесс построения такой кривой является обратным процессу нахождения отношения величин $\alpha(H_2)/\alpha(H_1)$. Зная величины приведенного давления для Кучино ($P_{пр}=500$ мм рт. ст.), было вычислено отношение $\alpha(H_2)/\alpha(H_1)$, где H_2 соответствует высоте Кучино, а H_1 — условиям построения кривой Фоуля. По формуле (15) было найдено отношение аргументов $u_1(H_2)/u_1(H_1)$, и отсюда отношение ординат калибровочной кривой Фоуля и калибровочной кривой для Кучино. Калибровочная кривая для Кучино (на рис. 1, кривая б) мало отличается от кривой Фоуля. Таким образом, при наблюдениях, проводимых на малых высотах (равнинные местности), использование кривой Фоуля дает надежные результаты. Однако при наблюдениях, проводимых в горных местностях, необходимо независимое построение калибровочной кривой по данным аэрологического зондирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макарова Е. А., Ситник Г. Ф., Кожевников Н. И. «Сообщения ГАИШ», № 126, 1962.
2. Макарова Е. А., Ситник Г. Ф., Кожевников Н. И. «Астрономический журнал» 1962 (в печати).
3. Fowle F. E. *Smithson. Ann.*, 3, 171, 1913.
4. Fowle F. E. *Smithson. Ann.*, 3, 182, 1913.
5. Унзольд А. Физика звездных атмосфер. ИЛ, М., 1959.
6. Кондратьев К. Я. Перенос длинноволнового излучения в атмосфере. ГИТТЛ, М., 1950.
7. Walshaw C. D. *Sci. Progr.*, 47, 185, 1959.
8. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. Физматгиз, М., 1958.
9. Mc Donald J. E. J. *Meteorol.*, 17, Nr. 3, 1960.
10. Elsasser W. M. Heat transfer by infrared radiation in the atmosphere, Mc Mil-
lon, 1942.

Поступила в редакцию
12. 4 1962 г.

Кафедра
астрофизики