

УДК 621.371.166.2

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ РАДИОВОЛН АТМОСФЕРНЫМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ В ДИАПАЗОНЕ 1,15 ÷ 1,5 мм

В. Я. Рядов, Н. И. Фурашов

Исследовано спектральное распределение коэффициента поглощения атмосферного водяного пара в окне прозрачности $\lambda = 1,4$ мм. Измерения выполнялись с ЛОВ методом изменяющейся влажности в полевых условиях при длине трассы ~ 3 км. Обсуждаются вопросы, связанные с поглощением радиоволн указанного диапазона димерами водяного пара. Результаты эксперимента сопоставлены с теорией и данными других измерений.

Исследование поглощения в участке спектра $\lambda = 1 \div 1,5$ мм, соответствующем одному из наиболее прозрачных атмосферных окон, вызывает значительный интерес как с точки зрения практического освоения коротких миллиметровых волн, так и совершенствования теории распространения микрорадиоволн в атмосфере. Последнее в особенности относится к теории поглощения димерами водяного пара [1-4], так как именно здесь она предсказывает наиболее значительный вклад димеров в суммарный коэффициент поглощения атмосферы.

До настоящего времени в литературе отсутствуют достаточно полные и надежные экспериментальные данные о поглощении в указанном участке спектра. На волнах, близких к центру окна, по существу, имеются лишь измерения [5] и [6]*, причем результаты их существенно расходятся между собой. Для коротковолнового крыла можно указать работы [9, 10].

Упомянем также серию работ Гебби и его сотрудников [11-16], посвященных относительным измерениям спектра поглощения атмосферы в рассматриваемом диапазоне. Они представляют определенный интерес в связи с появлением димерной концепции. В полученных спектрах был зарегистрирован ряд особенностей — аномалий поглощения. Авторами измерений они были отождествлены с линиями поглощения димеров. Однако делалось это, на наш взгляд, не всегда обоснованно. В частности, как будет показано ниже, надо считать ошибочной интерпретацию спектров, полученных в [15] на трассе в приземном слое**.

В данном сообщении приводятся результаты детального количественного исследования спектра поглощения водяного пара в участке 1,15 ÷ 1,55 мм.

Измерения выполнялись в полевых условиях методом изменяющейся влажности. Базовое расстояние составляло 2,94 км. Чтобы получить такой длины трассу в условиях местности, использовалась схема с отраженным лучом. Длина прямого и отраженного лучей составляла около 1,5 км, а угол между ними — примерно 0,5°. Для отражения излучения

* Данные радиоастрономических измерений [7, 8] вследствие ряда допущений, сделавшихся авторами при обработке наблюдений, и низкой точности нельзя считать удовлетворительными.

** Спектр поглощения атмосферы измерялся методом интерференционной спектроскопии с разрешением $0,5 \text{ см}^{-1}$ на горизонтальной трассе длиной 150 м на высоте 1680 м над уровнем моря.

применялось металлическое плоское зеркало диаметром 700 мм, закрепленное на поворотном устройстве. Почти горизонтальная трасса проходила на высоте около $2 \div 3$ м от поверхности земли.

В качестве источника излучения использовалась ЛОВ [17] с выходной мощностью $100 \div 300$ мвт. Подробное описание измерительной аппаратуры, процедуры измерений и методики обработки экспериментальных данных было приведено в [18].

Полученное в эксперименте спектральное распределение коэффициента поглощения атмосферного водяного пара $\Gamma_{вн}$ показано на рис. 1. С целью уменьшения влияния на результаты измерений колебаний температуры для обработки были выделены те данные, которые соответствовали близким температурам, отличающимся от среднего значения $T_{ср} = 15^\circ\text{C}$ не более чем на $\pm 1,5^\circ\text{C}$. Относительные изменения давления сухого воздуха P для этих данных были также невелики и тоже учитывались при обработке.

Для сравнения данных эксперимента с теорией на рис. 1 даны расчетные значения коэффициентов поглощения мономеров H_2O , димеров $(\text{H}_2\text{O})_2$ и их суммарные значения. Расчет мономерного поглощения выполнялся по формуле (6) работы [19] с использованием, за исключением пяти линий H_2O , теоретических полуширин, вычисленных Бенедиктом и Капланом [20, 21], причем согласно их указанию [21] полученные в [20] значения $\Delta\nu_{\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2}$ были приняты нами как $\Delta\nu_{\text{H}_2\text{O}-\text{сух. возд.}}$. Для пяти же наиболее интенсивных длинноволновых линий $\lambda = 1,63; 0,92; 0,789; 0,538; 0,398$ мм были использованы полученные нами экспериментальные значения полуширин. Они указаны в [18]. Расчетные данные для димерного поглощения заимствованы из [4]. Они соответствуют полуширине линий димера $0,8 \text{ см}^{-1}$, которая представляется наиболее вероятной (см. ниже, а также [4]).

Как можно видеть из рис. 1, экспериментальные коэффициенты поглощения в окне примерно в 1,8 раза превышают расчетные для моно-

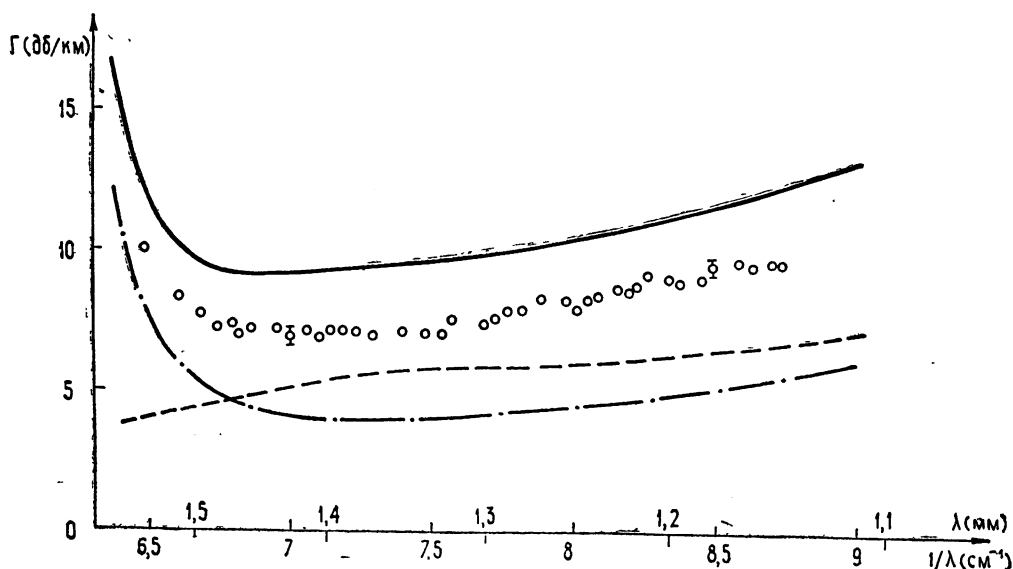


Рис. 1. Коэффициенты поглощения водяного пара для $\rho = 18 \text{ г/м}^3$, $T = 288^\circ\text{K}$, $P = 745 \text{ мм рт. ст.}$

○ ○ ○ — экспериментальные значения; — · — · — расчет для мономеров H_2O ; — — — — расчет для димеров $(\text{H}_2\text{O})_2$ [4]; — — — — суммарный расчетный коэффициент поглощения мономеров и димеров.

Вертикальными отрезками указана среднеквадратичная ошибка измерений.

меров. В то же время сопоставление с экспериментом суммарного коэффициента поглощения мономеров и димеров также не приводит к полному согласию и указывает на то, что теоретические данные для одного из поглощающих компонентов (мономеров или димеров) завышены. Представляется, однако, естественным предположить, что использованные здесь расчетные коэффициенты поглощения мономеров H_2O близки к истинным. В самом деле, как отмечалось в [19], основная погрешность расчета мономерного поглощения может быть связана с неточностью используемых в нем теоретических [20, 21] шириин вращательных линий H_2O^* . Но в последнее время, как уже отмечалось выше, были получены экспериментальные сведения для пяти наиболее сильных длинноволновых линий. Эти линии, во-первых, дают основной вклад ($65 \div 80\%$) в мономерное поглощение в длинноволновых атмосферных окнах прозрачности диапазона $\lambda > 0,4$ м. Во-вторых, сравнение измеренных значений шириин линий с расчетными по Бенедикту и Каплану [20, 21] показало их хорошее (с точностью примерно $\pm 5\%$) совпадение. Это позволяет надеяться, что и та часть расчетного коэффициента поглощения, которая определяется другими (кроме указанных пяти) линиями H_2O , также не содержит значительной ошибки.

Из сказанного вытекает, что причиной наблюдаемого расхождения нужно считать завышение теоретических коэффициентов поглощения димеров. Если принять мономерное поглощение равным теоретическому, то из рис. 1 следует, что для согласования расчета [4] с данным экспериментом коэффициент поглощения димеров должен быть уменьшен примерно в 1,6 раза.

Рассмотрение рис. 1 показывает также, что найденное из опыта спектральное распределение коэффициента поглощения атмосферного водяного пара не обнаруживает в участке $6,5 \div 9$ см⁻¹ сколь-либо заметных особенностей. Обращаясь теперь к работе [15], можно с уверенностью сказать, что если бы наблюдавшиеся авторами [15] в интервале $6 \div 9$ см⁻¹ особенности в действительности являлись линиями поглощения водяного пара, то они, без сомнения, были бы выявлены в настоящих измерениях, выполненных на большом базовом расстоянии (~ 3 км), в 20 раз превышающем оптический путь в эксперименте [15]. В самом деле, судя по спектрограмме работы [15], наблюдавшиеся там особенности не уступают по интенсивности довольно сильной линии поглощения мономеров H_2O с резонансом на $\lambda = 1,63$ м. При такой их интенсивности часть экспериментальных точек рис. 1 (например, вблизи 7 см⁻¹) должна была бы превысить уровень ~ 50 дб/км, разброс же их в опыте не превышает $\pm(0,3 \div 0,4)$ дб/км и обусловлен случайными ошибками измерений. На основании сказанного мы приходим к выводу об ошибочности результатов [15] в части, касающейся диапазона $6 \div 9$ см⁻¹. Относительно атмосферных аномалий поглощения, наблюдавшихся в этом диапазоне в других экспериментах [11, 14, 16], сказать что-либо пока трудно, так как картины спектра в них получены для су-

* В связи с расхождением эксперимента с теорией в отношении величины поглощения в окнах прозрачности в литературе высказывались предположения о неточности используемой в расчетах формы линии (в ее далеких крыльях) (см., например, [22, 23]). Однако убедительных доводов в пользу этого или экспериментальных обоснований (кроме указанного факта расхождения с расчетом) не имеется.

щественно иных, чем у нас, условий, а именно, на наклонных трассах по наблюдениям излучения Солнца*.

Наконец, что касается теоретических предсказаний о существовании некоторой особенности в спектре димеров вблизи 7 см^{-1} , то, как видно из рис. 1 (пунктирная кривая), эта особенность при полуширине линий димера $0,8 \text{ см}^{-1}$ выражена весьма слабо, расчетная же кривая суммарного коэффициента поглощения водяного пара не содержит ее совсем. При полуширине линий $0,4 \text{ см}^{-1}$ расчеты [4] дают такой величины пик поглощения вблизи 7 см^{-1} (см. рис. 1 в [4]), который уже отчетливо виден и в спектре суммарного коэффициента поглощения. Для условий наших измерений приращение величины поглощения в области пика должно составлять при полуширине $0,4 \text{ см}^{-1}$ около $1,3 \text{ дБ/км}$. Но тогда он стал бы заметен на полученной в эксперименте картине спектра. Таким образом, результаты настоящих измерений дают основание считать, что полуширина линии димера $(\text{H}_2\text{O})_2$ превышает $0,4 \text{ см}^{-1}$.

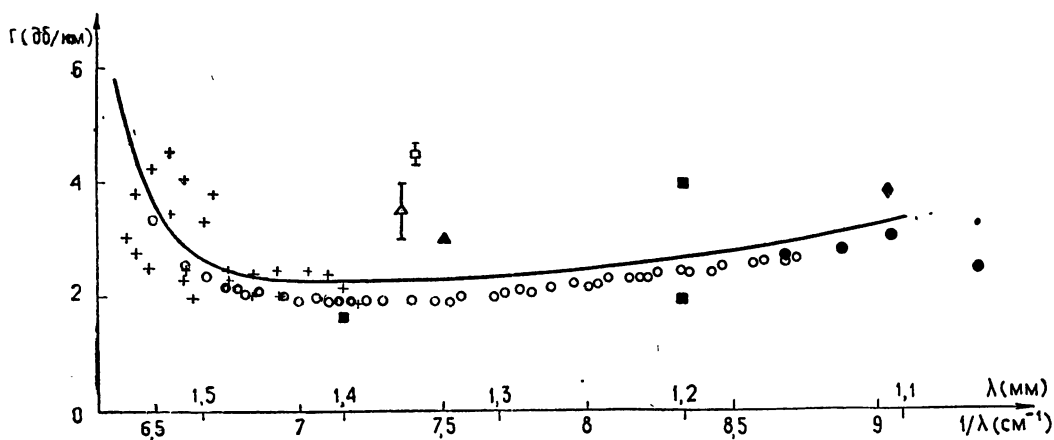


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных о поглощении в атмосферных парах воды по различным измерениям.

+ , □ , △ , ▲ , ■ , ◆ , ● — соответственно данные измерений [5, 6, 28, 7–10].
○○○ — настоящие измерения; ————— — теоретический суммарный коэффициент поглощения мономеров и димеров. Данные соответствуют $\rho_0 = 7,5 \text{ г/м}^3$, $T_0 = 293 \text{ °K}$, $P_0 = 750 \text{ мм рт. ст.}$

На рис. 2 проводится количественное сравнение полученных результатов с имеющимися данными о коэффициенте поглощения водяного пара по другим измерениям. Надо сказать, что большая часть их указана авторами для стандартных атмосферных условий: $\rho_0 = 7,5 \text{ г/м}^3$, $T_0 = 293 \text{ °K}$, $P_0 = 750 \text{ мм рт. ст.}$ Поэтому для сопоставления данные рис. 1 были пересчитаны к тем же условиям. Следует заметить, что при пересчете величины суммарного коэффициента поглощения $\Gamma_{\text{вп}}$ от одних значений ρ , T , P к другим возникает трудность, связанная с необходимостью точного знания мономерной и димерной составляющей порознь и их зависимостей от ρ , T и P . Такой пересчет данных рис. 1, а также

* Как показали расчеты [24], обнаружение димерных особенностей в спектре поглощения атмосферы на $5 \div 10 \text{ см}^{-1}$ при наблюдениях на наклонных или вертикальных трассах с уровня земли, по-видимому, невозможно. По мнению авторов [25, 26] наблюдавшиеся аномалии поглощения скорее могут быть связаны с линиями примесных газов атмосферы (N_2O , CO , NO). Вместе с тем, нельзя не отметить, что в недавних измерениях [27], выполненных при тех же примерно условиях, что и эксперименты [11, 16], не было зарегистрировано никаких особенностей в участке $6 \div 9 \text{ см}^{-1}$.

результатов измерений [10] к данным рис. 2 здесь выполнен в предположении, что мономерное поглощение равно теоретическому, а разность $\Gamma_{вп}^{эксп} - \Gamma_{вп}^{теор}$ есть димерное поглощение. Зависимости коэффициентов поглощения мономеров и димеров от температуры и давления приняты при пересчете в соответствии с [4].

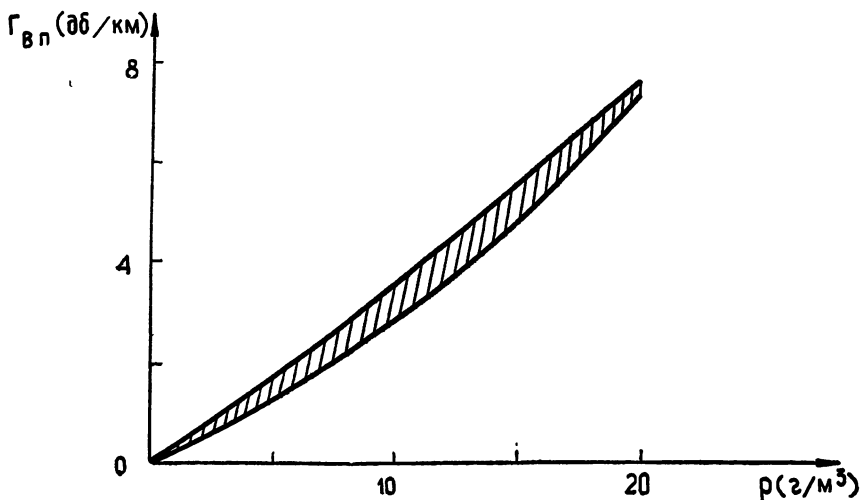


Рис. 3. Коэффициент поглощения водяного пара в центре атмосферного окна прозрачности $\lambda = 1,4$ мкм для $T_0 = 293$ К, $P_0 = 750$ мм рт. ст. и различных значений влажности воздуха. Штриховкой указана область возможных значений, вытекающих из результатов настоящих измерений.

Чтобы оценить максимальную ошибку, которая может возникнуть при пересчете в силу делающихся допущений, нами был выполнен также пересчет данных для такого крайнего случая, когда полагается, что все измеренное поглощение определяется только мономерами H_2O . Результаты пересчета в указанных двух предположениях (т. е. когда мономерное поглощение принимается равным либо расчетному, либо всему измеренному) экспериментального значения $\Gamma_{вп}$ для центра окна ($\lambda = 1,4$ мкм) от условий эксперимента ($\rho = 18$ г/м³, $T = 288$ К, $P = 745$ мм рт. ст.) к стандартным температуре $T_0 = 293$ К, давлению сухого воздуха $P_0 = 750$ мм рт. ст. и различным значениям влажности показаны на рис. 3 (нижняя и верхняя кривая соответственно). Из рисунка видно, что, например, при $\rho_0 = 7,5$ г/м³ значения $\Gamma_{вп}$, полученные при пересчете в том и другом предположении, отличаются примерно на 30%.

Данные рис. 3, получающиеся на основании результатов настоящих измерений, могут быть полезны для оценки поглощения в центре атмосферного окна прозрачности $\lambda = 1,4$ мкм при влажностях воздуха, имеющих место в реальной атмосфере.

Авторы благодарны П. П. Прыгунову, А. И. Хвостовой, А. В. Поварову, В. Ф. Васильеву за помощь при измерениях и обработке полученных данных, М. Б. Зиничевой, проводившей расчеты на ЭВМ, и С. А. Жевакину за обсуждение результатов измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Викторова, С. А. Жевакин, Докл. АН СССР, 171, 833 (1966).
2. А. А. Викторова, С. А. Жевакин, Докл. АН СССР, 171, 1061 (1966).
3. А. А. Викторова, С. А. Жевакин, Докл. АН СССР, 194, 291 (1970).
4. А. А. Викторова, С. А. Жевакин, Докл. АН СССР, 194, 540 (1970).

5. Ю. А. Дрягин, А. Г. Кисляков, Л. М. Кукин, А. И. Наумов, Л. И. Федосеев, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 9, № 6, 1078 (1966).
6. Ю. И. Малышенко, Радиотехника и электроника, 14, 522 (1969).
7. M. Cohn, F. L. Wentworth, J. C. Wiltse, Proc. IEEE, 51, 1219 (1963).
8. J. A. Bastin, Infrared Phys., 6, 209 (1966).
9. L. Frenkel, D. Woods, Proc. IEEE, 54, 498 (1966).
10. В. Я. Рядов, Н. И. Фурашов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 9, № 5, 859 (1966).
11. H. A. Gebbie, W. J. Burroughs, Nature, 217, 1241 (1968).
12. H. A. Gebbie, W. J. Burroughs, J. Chamberlain, J. E. Harries, R. G. Jones, Nature, 221, 143 (1969).
13. J. E. Harries, W. J. Burroughs, H. A. Gebbie, JQSRT, 9, 79^o (1969).
14. J. E. Harries, W. J. Burroughs, Infrared Phys., 10, 165 (1970).
15. H. A. Gebbie, R. A. Bohlander, G. W. Pardoe, Nature, 230, 521 (1971).
16. W. J. Burroughs, J. Chamberlain, Infrared Phys., 11, 1 (1971).
17. М. Б. Голант, Р. Л. Виленская, Е. А. Зюлина, З. Ф. Каплун, А. А. Негирев, В. А. Париров, Т. Б. Реброва, В. С. Савельев, ПТЭ, № 4, 136 (1965).
18. В. Я. Рядов, Н. И. Фурашов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 15, № 10, 1475 (1972).
19. С. А. Жевакин, А. П. Наумов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 10, № 9—10, 1213 (1967).
20. W. S. Benedict, L. D. Kaplan, J. Chem. Phys., 30, 388 (1959).
21. W. S. Benedict, L. D. Kaplan, JQSRT, 4, 453 (1964).
22. D. E. Burch, JOSA, 58, 1383 (1968).
23. W. J. Burroughs, R. G. Jones, H. A. Gebbie, JQSRT, 9, 809 (1969).
24. А. А. Викторова, С. А. Жевакин, Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана (в печати).
25. В. Н. Воронов, А. Г. Кисляков, Э. П. Кукина, А. И. Наумов, Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 8, 29 (1972).
26. A. G. Kislyakov, Infrared Phys., 12, 61 (1972).
27. J. C. Mather, M. W. Werner, P. L. Richards, Astrophys. J., 170, L59 (1971).
28. J. N. Gaitskell, R. A. Newstead, J. A. Bastin, Phil. Trans. Roy. Soc. London, ser. A, 264, 195 (1969).

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
25 января 1972 г.

INVESTIGATION OF THE SPECTRUM OF RADIO WAVE ABSORPTION BY WATER VAPOURS IN 1.15÷1.5 mm BAND

V. Ya. Ryadov, N. I. Furashov

The spectral distribution of the absorption coefficient of atmosphere water vapour in a transparent window $\lambda=1.4$ mm has been investigated. Measurements have been made with BWT by the varying humidity method in the field conditions at the trace length ~ 3 km. The questions concerning the radio wave absorption in the given band by water vapour dimers are discussed. The experimental results are compared with the data of other measurements.