

УДК 621.371.32.029.65

К ОЦЕНКАМ ЗАВИСЯЩЕГО ОТ ВЛАЖНОСТИ ИНДУЦИРОВАННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ МИКРОРАДИОВОЛН В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

К.П. Гайкович, А.П. Наумов

1. Проблемными вопросами распространения миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн в земной атмосфере являются интерпретации нелинейной (по абсолютной влажности ρ) части поглощения водяного пара $\gamma_{\text{нл}}$ и «избыточного» (по сравнению с теоретическими значениями) линейного по ρ поглощения $\Delta\gamma$ [1, 2]. Нелинейное по абсолютной влажности поглощение в водяном паре выделялось не во всех работах, посвященных рассматриваемой проблеме (см., например, табл. 2 данных в [2]). Численные значения $\gamma_{\text{нл}}$ и $\Delta\gamma$ по результатам работ [3—6], на характерных длинах волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов приведены в таблице. Рассматриваемые поглощения имеют нерезонансный вид на уровне моря.

Для объяснения нелинейного по ρ поглощения в [7] предложена теория поглощения радиоволн димерными образованиями $(\text{H}_2\text{O})_2$. Для решения второй из перечисленных задач в [8] рассматривалась возможность возникновения нерезонансного спектра поглощения из-за дополнительной поляризации молекул H_2O при соударениях. В [9] по схеме расчетов [10] получено, что учет поглощения N_2 и O_2 , обусловленного наведенными дипольными моментами при соударениях этих молекул с молекулами H_2O (и, следовательно, зависящего от влажности), устраняет отмеченное выше расхождение в линейных по ρ частях поглощения в области $\lambda \geq 0,6$ мм. Заметим, однако, что в [10] используется зависимость наведенного дипольного момента μ от межмолекулярного расстояния z в виде, характерном для короткодействующих взаимодействий частиц типа обменных сил, который обычно используется для оценки индуцированного поглощения при соударениях атомов благородных газов в субмиллиметровом и инфракрасном диапазонах волн. Количественные оценки [8, 9] зависящего от влажности индуцированного поглощения микрорадиоволн в земной атмосфере представляются завышенными.

В данной работе вычислены коэффициенты нерезонансного поглощения γ электромагнитной энергии молекулами N_2 , O_2 и H_2O , обусловленные индуцированными дипольными моментами при бинарных соударениях с молекулами H_2O . Дополнительное поглощение, возникающее при соударениях N_2 — H_2O и O_2 — H_2O , пропорционально ρ , а поглощение, возникающее из-за дополнительной поляризации молекул водяного пара при соударениях H_2O — H_2O , пропорционально ρ^2 . Расчет выполнялся по методике, аналогичной [11], при значении показателя степени $m=3$ в выражении для величины индуцированного дипольного момента.

Значения «избыточного» (по сравнению с теоретическими мономерными коэффициентами) линейного по абсолютной влажности ρ поглощения $\Delta\gamma$ и квадратичной по ρ части поглощения $\gamma_{\text{нл}}$ на ряде длин волн при стандартных атмосферных условиях на уровне моря ($P=760$ мм рт. ст., $T=293^\circ\text{K}$, $\rho=7,5$ г/м³)

λ , мм	1,4	0,87	0,73	0,45	0,35
$\Delta\gamma_{\text{д}}$, Б/км	0,48±0,16 [6]	0,6±0,9 [6]	0,7±2,4 [6]	7,4±4 [6]	19,3±6 [6]
$\gamma_{\text{нл}}$, дБ/км	0,3±0,05 [4] *	0,9±0,5 [5]	1,5±2,2 [3] **	—	—

* В таблице приведены результаты [4] по измерениям серии 1.

** Данные измерения относятся к абсолютной влажности $\rho=7,5$ г/м³ и к следующим средним параметрам атмосферы: $T=282^\circ\text{K}$, $P=750$ мм рт. ст.

В расчетах мы не учитывали индуцированное резонансное поглощение N_2 и O_2 , отвечающее правилу отбора с изменением квантового числа полного момента количества движения $\Delta J = \pm 2$, поскольку учет соответствующих линий не может изменить порядок величины поглощения, по крайней мере, в длинноволновой области спектра *. Строгое решение поставленной задачи требует, вообще говоря, квантового подхода, но полученные ниже полуклассическим путем результаты (эффекты, обусловленные индуцированными механизмами поглощения, оказываются на 2—3 порядка меньше экспериментальных результатов, которые нуждаются в интерпретации) следует признать достаточными для выяснения принципиальной стороны вопроса.

* На полный интеграл по частоте от мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ'' , обусловленной резонансными переходами с $\Delta J = \pm 2$, приходится $\sim 3/4$ части от интеграла суммарной величины ϵ'' , включающей вклад нерезонансного поглощения $\Delta J = 0$ [11].

2. Расчеты индуцированного поглощения выполнялись в данной работе по формуле

$$(1) \quad \gamma \left(\frac{\partial E}{\partial KM} \right) = 10^6 \log_{10} e \frac{\omega}{c} \varepsilon''(\omega).$$

В (1) ω — циклическая частота, c — скорость света. Величина ε'' представлялась в виде произведения фактора интенсивности J на фактор формы линии $S(\omega)$. Вид зависимости $S(\omega)$ от частоты находился путем усреднения квадрата модуля Фурье-преобразования $|\mu(\omega)|^2$ от временного фактора индуцированного дипольного момента

$$(2) \quad \mu(t) \sim \frac{\cos(\omega_0 t + \Phi)}{[r(t)]^m}$$

по фазам Φ , сечениям соударений и относительным скоростям соударяющихся молекул. В (2) ω_0 — частота вращения движущейся молекулы. Форма линии для индуцирован-

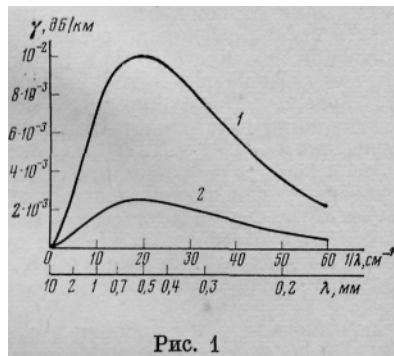


Рис. 1

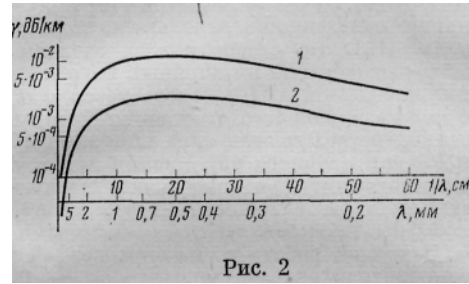


Рис. 2

Рис. 1. Вычисленные по формуле (1) значения коэффициентов поглощения, индуцированного молекулярными соударениями $\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2$ (кривая 1) и $\text{H}_2\text{O}-\text{O}_2$ (кривая 2) в области $\lambda = 0,2-10$ см. Давление $P=760$ м. рт. ст., температура $T=293^\circ\text{K}$, абсолютная влажность $\rho=7,5$ г/м³

Рис. 2. Вычисленные значения суммарного коэффициента поглощения, индуцированного молекулярными соударениями $\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2$ и $\text{H}_2\text{O}-\text{O}_2$ (кривая 1), и значения коэффициента поглощения, индуцированного соударениями $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ (кривая 2), в области $\lambda = 0,2-10$ см. Давление $P=760$ мм рт. ст., температура $T=293^\circ\text{K}$, абсолютная влажность $\rho=7,5$ г/м³

ного поглощения выражается через функции Бесселя второго рода от мнимого аргумента. В полученных результатах для нерезонансной части поглощения частота ω_0 полагалась равной нулю.

Фактор интенсивности для нерезонансного поглощения составляет

$$(3) \quad \mathcal{J}_{JJ} = (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \sum_J \frac{J(J+1)}{(2J-1)(2J+3)} f_J,$$

где f_J — относительное число молекул во вращательном состоянии, соответствующем квантовому числу J . Величина $\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$, вычислялась методами классической статистической механики с использованием потенциала взаимодействия молекул в форме Леннарда — Джонса

$$(4) \quad U(r) = -4\varepsilon \left[\left(\frac{b_0}{r} \right)^{12} - \left(\frac{b_0}{r} \right)^6 \right]$$

с параметрами b_0, ε , взятыми из [12].

3. Результаты выполненных расчетов γ при стандартных атмосферных условиях на уровне моря в диапазоне волновых чисел $1/\lambda = 0-60$ см⁻¹ представлены на рис. 1, 2. Из сравнения результатов, приведенных в таблице и на рис. 1, 2, видно что как линейная, так и квадратичная по абсолютной влажности части поглощения водяного пара, индуцированного при молекулярных соударениях $\text{N}_2-\text{H}_2\text{O}$, $\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$, $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$,

оказываются недостаточными даже по порядку величины для интерпретации соответствующих измеренных коэффициентов поглощения.

С учетом полученного результата и количественных оценок квадратичных эффектов поглощения, обусловленных самоуширением линий водяного пара в атмосфере [3—5], следует констатировать, что на данном этапе не существует альтернативы димерной гипотезе для интерпретации нелинейной (по абсолютной влажности) части поглощения водяного пара, хотя самой этой гипотезе присущи определенные проблемы и, по-видимому, главной из них остается получение достаточного экспериментального материала о заметной роли димеров в атмосферном ослаблении микрорадиоволн (см. [4]).

Что касается интерпретации «избыточного» (линейного по ρ) поглощения радиоволн в атмосферных окнах прозрачности, то с учетом экспериментальных исследований дипольных моментов молекулы H_2O [13, 14] и ширин соответствующих спектральных линий [15], оценок вклада изотопов воды [16] и линий вращательного спектра колебательного состояния с наименьшей фундаментальной частотой колебаний молекул H_2O [17] в значения γ , а также с учетом выполненных оценок эффективности индуцированных при соударениях $\text{N}_2\text{—H}_2\text{O}$, $\text{O}_2\text{—H}_2\text{O}$ механизмов поглощения (см. выше), теперь можно сделать однозначный вывод о причинах упомянутого расхождения, а именно — в качестве основной причины назвать неадекватность описания молекулярного поглощения в крыльях спектральных линий существующими и практически используемыми для этих целей форм-факторами линий.

Выполненное в данном сообщении рассмотрение позволяет сузить круг обсуждаемых причин отмеченного расхождения в значениях γ и стимулирует постановку задач по детальному исследованию формы спектральной линии в радиодиапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Жевакин, А. П. Наумов, Изв. вузов МВССО СССР (Радиофизика), 1967, **10**, 9-10, 1213.
2. А. В. Соколов, Распространение миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн в атмосфере Земли, Сб. Радиотехника, **5**, Изд. ВИНТИ АН СССР, 1974, стр. 5.
3. В. Я. Рядов, Н. И. Фурашов, Изв. вузов МВССО СССР (Радиофизика), 1972, **15**, 10, 1475.
4. Л. М. Кукин, Ю. Н. Ноздрин, В. Я. Рядов, Л. И. Федосеев, И. И. Фурашов, Радио техника и электроника, 1975, **20**, 10, 2017.
5. В. Я. Рядов, Н. И. Фурашов, Изв. вузов МВССО СССР (Радиофизика), 1976, **19**, 9, 1308.
6. S. A. Zhevakin, V. Ya. Ryadov, N. I. Furashov, Papers presented at the anglo-soviet seminar on atmospheric propagation at millimetre and submillimetre wavelengths, ed. the University of Wales, IST, 1978, p. A1.
7. А. А. Викторова, С. А. Жевакин, Докл. АН СССР, 1966, **171**, 4, 833.
8. L. Frenkel, J. Mol. Spectr., 1968, **26**, 2, 227.
9. В. С. Станкевич, Тезисы докладов XII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн (Томск, июнь 1978 г.), ч. 2, стр. 56, Изд. Наука, 1978.
10. Н. В. Levin, G. Birnbaum, Phys. Rev., 1967, **154**, 1, 86.
11. А. А. Maryott, G. Birnbaum, J. Chem. Phys., 1962, **36**, 8, 2026.
12. Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд, Молекулярная теория газов и жидкостей, ИЛ, 1961.
13. S. A. Clough, Y. Beers, G. P. Klein, L. S. Rothman, J. Chem. Phys., 1973, **59**, 5, 2254.
14. T. R. Dyke, J. S. Muenter, J. Chem. Phys., 1973, **59**, 6, 3125.
15. В. Я. Рядов, Н. И. Фурашов, Изв. вузов МВССО СССР (Радиофизика), 1975, **18**, 3, 358.
16. T. F. Rogers, Phys. Rev., 1954, **93**, 1, 248.
17. А. П. Наумов, Изв. вузов МВССО СССР (Радиофизика), 1967, **10**, 8, 1115.

Поступило в редакцию
18IV1979