

КОНТИНУАЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ДИАПАЗОНА 100 – 210 ГГц В СМЕСИ ВОДЯНОГО ПАРА С АЗОТОМ

Паршин В. В., [Дрягин Ю. А.] Кукин Л. М., Федосеев Л. И.,
Третьяков М. Ю., Кошелев М. А., Коваль И. А.

Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, Н-Новгород, 603950, Россия
Тел.: +7(8312) 164966; e-mail: parsh@appl.sci-nnov.ru

Аннотация – С помощью резонаторного спектрометра проведено исследование зависимости континуального поглощения излучения от влажности в смеси паров воды с азотом в диапазоне 100-210 ГГц при температурах 297 К и 274,5 К. Для каждой температуры выделены линейная и квадратичная по влажности части континуального поглощения и определены величины соответствующих параметров. Сделана оценка температурной зависимости полученных параметров. Представлен сравнительный анализ полученных данных с результатами предшествующих экспериментальных и теоретических исследований. Выполнены оценочные результаты расчёта континуального поглощения при температуре 269,5 К.

I. Введение

Настоящая работа является дальнейшим развитием работ проводимых в ИПФ РАН по исследованию атмосферного поглощения резонаторными методами [1,2] и направлена на исследование самой «спекулятивной» и трудно исследуемой части атмосферного поглощения – континуального поглощения (КП).

Более полувека назад было обнаружено, а впоследствии подтверждено как в полевых, так и в лабораторных экспериментах, что величина поглощения ММ-СубММ излучения в окнах прозрачности атмосферы значительно превышает расчетное, получаемое при использовании формы линии Ван Флека-Вейскопфа, как сумма профилей поглощения всех известных молекулярных линий. Это избыточное поглощение, называемое континуальным, разделяют на поглощение в сухом воздухе и в водяном паре. Вторая часть поглощения также зависит как от взаимодействия молекул воды между собой (пропорционально квадрату парциального давления) так и от взаимодействия молекул воды с другими газами (пропорционально произведению их парциальных давлений). Большинство исследователей сходятся в том, что величина КП возрастает пропорционально квадрату частоты излучения, что подтверждается работами A. Bauer et al., суммированного в [3,5]. Однако теоретический расчет КП, возникающего из-за столкновений молекул воды с молекулами азота, проделанный в работе [4] предсказывает частотный показатель степени $n_3=2.059$ в диапазоне 0 – 450 ГГц при температурах 220 – 330 К. Несмотря на значительное число работ, посвященных КП в ММ-СубММ диапазонах, достигнутое представление о проблеме является неудовлетворительным. Экспериментальные данные сравнительно немногочисленны, имеют большой разброс и не всегда согласуются друг с другом. Большинство экспериментов сделаны при плюсовых температурах. Экстраполяция зависимостей в отрицательные температуры, соответствующие большей части земной атмосферы, приводит к значительным ошибкам. Поэтому наши исследования проведены и при отрицательных температурах. В настоящее время все еще не существует однозначного мнения о физических механизмах, возникновения КП, поэтому в моделях поглощения используется эмпирическая формула [3], которая для смеси водяного пара с азотом может быть записана в виде:

$$\alpha_{\text{cont}}(f, T) = \left\{ \left[C_{\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2} P_{\text{N}_2} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{n_1} + C_{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}} P_{\text{H}_2\text{O}} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{n_2} \right] P_{\text{H}_2\text{O}} + \left[C_{\text{N}_2-\text{N}_2} P_{\text{N}_2}^2 \left(\frac{T_0}{T} \right)^{n_3} \right] \right\} \times \left(\frac{T_0}{T} \right)^3 f^{n_4},$$

где: $\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2$, $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ и N_2-N_2 , – коэффициенты связанные с взаимодействием молекул воды и азота, воды с водой и азота с азотом, P_{N_2} и $P_{\text{H}_2\text{O}}$, – парциальные давления азота и паров воды; T – температура ($T_0 = 300$ К); n_1 , n_2 , n_3 – показатели степени температурных зависимостей; n_4 – показатель степени частотной зависимости, обычно = 2 [3] или близко к этому ($n_4 = 2,059$ [5]).

Таким образом, получение новых данных о континуальном поглощении актуально как для уточнения эмпирических моделей, так и для понимания природы континуума.

II. Измерительная установка

Установка и методика измерений хорошо изложены в [1,2] нововведением является размещение резонатора в охлаждаемом боксе с дозированной подачей азота, кислорода, сухого воздуха и паров воды. Для учета аппаратной функции резонатор заполнялся чистым азотом. Таким образом, измеряемое в эксперименте поглощение не содержало азотного континуума.

III. Континуум

Записи спектра поглощения паров воды в азоте при температуре 297 К и давлении 977,3 гПа, полученные при шести различных значениях относительной влажности смеси, показаны на рис.1. (логарифмический масштаб).

Зависимость величины поглощения при температуре 274,5 К и давлении 977,3 гПа от влажности смеси паров воды с азотом, дискретно увеличиваемой от 3 до 57%, измерялась последовательно на пяти частотах: 110, 125, 140, 155, 170 ГГц и снова для контроля на 110 ГГц. После вычитания вклада линий поглощения водяного пара, полученный спектр КП в зависимости от водосодержания показан на рис. 2.

III. Обсуждение

Сравнительный анализ показывает, что отличие наших значений коэффициентов $C_{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}}$ от экспериментальных значений [6] нарастает с уменьшением температуры. При 300К отличие не выходит за пределы статистических ошибок. При 297К *превышение* составляет 35%, при 274,5К уже более 80%, значительно превышая ошибку измерений. Аналогичное сравнение $C_{\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2}$ показывает, что наши значения на ~50% *меньше* соответствующих значе-

ний из [6] при 300 К, но совпадают в пределах 3σ (~10%) при 274,5 К. Отметим хорошее (~15%) согласие значений наших коэффициентов $S_{\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2}$ с результатами расчетов [5]. Отметим, что почти все наши коэффициенты не отличаются от экспериментальных данных Liebe [4] более чем на 35%, за исключением $S_{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}}^{274}$, отличие для которого составляет более 2,5 раза. Полученная нами температурная зависимость для обеих компонент континуума оказалась значительно более сильной, чем у предшественников.

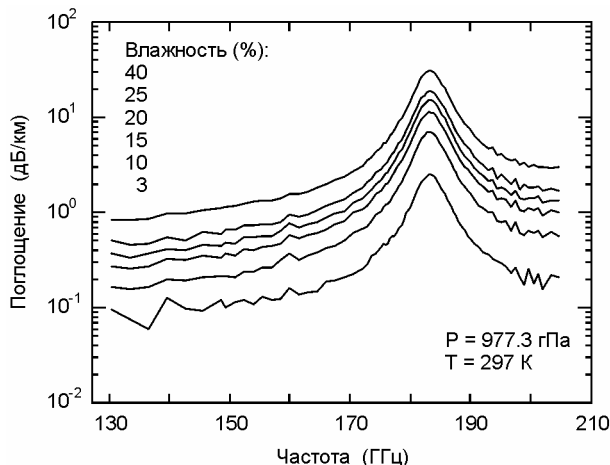


Рис. 1. Записи спектра поглощения смеси паров воды с азотом.

Fig. 1. Absorption spectrum of water vapour and Nitrogen

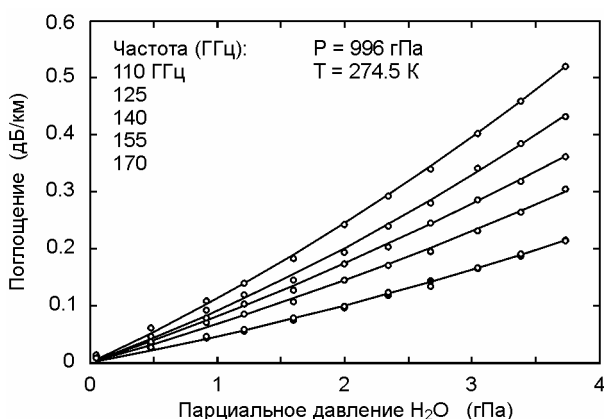


Рис. 2. Зависимость континуального поглощения от давления паров воды.

Fig. 2. Continuum water vapour absorption spectrum vs. water pressure

IV. Заключение

В диапазоне 100–210 ГГц исследовано КП смеси паров воды и азота. Количественные измерения КП такой смеси на этих частотах и при температурах около и ниже точки замерзания воды проведены впервые. Определены параметры КП, включая температурную зависимость его компонент. Характер измеренного поглощения в целом неплохо согласуется с предшествующими данными и современными представлениями о КП, однако его температурная зависимость получилась более сильной, чем в других работах [3-6], что может быть связано со свойствами КП, проявляющегося в увеличении степени температурной зависимости при понижении абсолютной температуры.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 06-02-16082-а, 05-02-17522-а и Программы «Проблемы радиофизики».

V. Список литературы

- [1] Parshin V. V., Krupnov A. F., Myasnikova S. E., Tretyakov M. Yu., Shanin V. N. "The ultra-low absorption investigations in dielectrics and atmosphere at 45-200 GHz frequency range". CriMiCo'2000 pp. 490-492, 2000.
- [2] Krupnov A. F., Tretyakov M. Yu., Parshin V. V., Shanin V. N., Myasnikova S. E. "Modern millimetre-wave spectroscopy of broad lines". Journal of Molecular Spectroscopy, V. 202, pp. 107-115, 2000.
- [3] Rozenkranz P. W. "Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models" Radio Sci. V.33, pp. 919-928, 1998.
- [4] Liebe H. J., Hufford G. A., Cotton M. G. "Propagation Modeling of Moist Air and Suspended Water/Ice Particles at Frequencies Below 1000 GHz" AGARD Conf. Proc. V.542, pp.3-10, 1993.
- [5] Ma Q., Tipping R. H., "A simple analytical parameterization for the water vapor millimeter wave foreign continuum" J. Quant. Spectr. & Radiat. Transfer. V.82, pp 517-531, 2003.
- [6] Kuhn T., Bauer A., Godon M., Buhler S., Kunzi K. "Water vapor continuum: absorption measurements at 350 GHz and model calculations" J. Quantum Spectroscopy and Radiative Transfer. V. 74, pp. 545-562, 2002.

INVESTIGATION OF MM AND SUB-MM WAVES ABSORPTION USING THE METHODS OF PRECISE RESONATOR SPECTROSCOPY

Parshin V. V., Draygin Yu. A., Kukin L. M., Fedoseev L. I., Tretyakov M. Yu., Koshelev M. A., Koval I. A.

Institute of Applied Physics RAS
46 Ulyanov St., 603950, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract – Investigation of continuum absorption (CA) depending on humidity in a mixture of nitrogen and water vapor at the atmospheric pressure has been conducted within 100–210 GHz frequency range at two temperatures: 297 K and 274.5 K using resonator spectrometer. Linear and square humidity parts of the continuum absorption have been separated from the experimental data and values of corresponding parameters have been determined for each temperature. Temperature dependence of the parameters obtained has been estimated. Comparative analysis of the data obtained and results of previous theoretical and experimental studies is presented. The estimation calculations of CA are presented for 269.5K. The behavior of CA measured is in good agreement with previous measurements and modern conception, but CA temperature dependence is stronger than in previous publications [3-6]. It is concerned with CA properties.