

## СПЕКТРОСКОПИЯ АТМОСФЕРНЫХ ГАЗОВ

**В.Н. Арефьев**

УДК 621.375.826 : 551.5

### **МОЛЕКУЛЯРНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ВОДЯНЫМ ПАРОМ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОКНЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ 8–13 МКМ**

Представлены обобщенные результаты многолетних комплексных исследований континуального и селективного поглощения водяным паром излучения  $\text{CO}_2$ -лазера в лабораторных и натуральных условиях при широком диапазоне изменений атмосферных параметров. Приведена уточненная модель континуума водяного пара, учитывающая все его закономерности и хорошо согласующаяся с данными других лабораторных опытов, а также с результатами натуральных наблюдений.

#### **Введение**

Поглощение в окне относительной прозрачности атмосферы 8–13 мкм является основным фактором, определяющим величину оттока теплового излучения от Земли в космос, т.е. играет важную роль в формировании теплового баланса нашей планеты. Первые исследования окна 8–13 мкм датируются концом прошлого столетия, а в начале этого века поглощение в окне было связано с водяным паром [1]. В 1938 г. в [2] выдвинута гипотеза о формировании этого поглощения в виде континуума за счет далеких крыльев колебательно-вращательной  $\nu_2$  и чисто вращательной полос поглощения водяного пара с центрами соответственно около 6,3 и далее 14 мкм. Согласно [2] оптическая толща водяного пара задается в виде произведения полного влагосодержания на коэффициент поглощения, который линейно зависит от общего давления и слабо возрастает с увеличением температуры. Продолжавшиеся исследования в натуральных условиях привели в начале шестидесятых годов к парадоксальному выводу о возможности существования отрицательных оптических толщ при малых влажностях воздуха [13]. Для снятия этого парадокса в [3] была высказана идея о нелинейной зависимости континуального поглощения от влажности.

Качественно новый этап исследований окна 8–13 мкм начался в конце шестидесятых и первой половине семидесятых годов. Этому способствовала появившаяся возможность использования как в лабораторных опытах на длиннобазовых многоходовых кюветах, так и на длинных трассах в натуральных условиях, в качестве источника излучения  $\text{CO}_2$ -лазеров, спектр генерации которых на различных изотопах углекислого газа в полосах  $00^{\circ}1-10^{\circ}0$  и  $00^{\circ}1-02^{\circ}0$  перекрывает большую часть окна 8–13 мкм. Более того, широкие перспективы использования этих лазеров в решении различных научных и технических задач, например, дистанционного зондирования атмосферы, оптических линий связи, оптической локации и т.д., потребовали более надежной информации о молекулярном поглощении излучения 8–13 мкм. Так, селективное поглощение, малозначимое по сравнению с континуальным для излучения Солнца, Земли и классических тепловых источников, оказывается весьма существенным для лазерного излучения, если имеет место хотя бы частичное перекрытие линий генерации и поглощения.

В условиях реальной атмосферы изучение процессов молекулярного поглощения водяного пара затруднено, во-первых, относительной малостью величин поглощения, во-вторых, одновременным действием ряда не поддающихся точному разделению и контролю факторов (температура, давление, концентрация поглотителя, неоднородность среды и т.д.) и, в-третьих, наложением аэрозольного ослабления и молекулярного поглощения других газовых составляющих атмосферы. Поэтому последние 20 лет основное внимание было сосредоточено на лабораторных экспериментах с помощью оптических многоходовых кювет, в которых можно изменять в нужных пределах и строго контролировать состав, температуру и давление исследуемой среды, а также концентрацию поглощающего газа. Анализ уже первых результатов лабораторных исследований [4–6] не только подтвердил нелинейную зависимость континуального поглощения от содержания водяного пара, но и выявил отрицательную зависимость поглощения от температуры, т.е. уменьшение поглощения с ростом температуры [5, 6]. Такой вид температурной зависимости позволил выдвинуть димерную гипотезу механизма образования континуума водяного пара в окне 8–13 мкм [6, 7].

Со второй половины семидесятых годов помимо многоходовых кювет для проведения лабораторных экспериментов стали применяться лазерные оптико-акустические спектрофоны [8]. Простота конструкции и легкость обработки результатов измерений привлекли к спектрофонам внимание многих исследователей, которые выполнили измерения коэффициентов поглощения водяным паром излучения для десятков линий генерации нескольких изотопов углекислого газа [9–

13]. Однако недостатки спектрофонов, связанные с необходимостью их предварительной калибровки, зависящей от мощности лазера и температуры среды, приводят к большим систематическим погрешностям измерений [13, 14]. Вследствие этого опубликованные данные измерений с помощью спектрофонов зачастую заметно разнятся между собой и с результатами измерений с помощью кювет [12, 13, 15–17]. Это обстоятельство вместе с рядом качественных различий в результатах разных работ побудило к проведению комплексных лабораторных и натуральных исследований молекулярного (селективного и континуального) поглощения водяным паром излучения перестраиваемых CO<sub>2</sub>-лазеров, результаты которых приводятся в настоящей статье.

### Аппаратура и методика

Лабораторные исследования молекулярного поглощения водяного пара проводились при помощи аппаратного комплекса, основой которого является оптическая многоходовая кювета, собранная по схеме Уайта [18]. Базовая длина кюветы, равная 50 м, позволяла достигать толщин исследуемого слоя газа до 3 км. В кювете имелась возможность регулировать и контролировать изменения давления от 10<sup>-7</sup> до 5 атм и температуры от 284 до 353°К. Специальные устройства обеспечивали создание в кювете среды из чистого водяного пара или его смеси с азотом (осушенный воздух) [19].

Источником излучения служил универсальный, перестраиваемый углекислотный лазер, собранный по традиционной схеме. Резонатор образован сферическим золоченым зеркалом и дифракционной решеткой, работающей в автоколлимационном режиме с обратной связью в первом и выводе излучения в нулевом порядке спектра решетки. Автоподстройка частоты излучения осуществляется пьезоэлементом. При смене рабочей смеси удалось получить генерацию на линиях трех изотопов: <sup>12</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub>, <sup>13</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub> и <sup>12</sup>C<sup>18</sup>O<sub>2</sub> [20].

Приемником излучения служило охлаждаемое жидким азотом фотосопротивление на основе германия, легированного золотом, электрический сигнал с которого регистрировался соответствующим устройством, включающим микроЭВМ.

Абсолютно идентичная схема эксперимента была реализована в натуральных условиях. Источник и приемник излучения вместе с зеркалами системы Уайта находились в помещениях, а трасса проходила между ними. Единственным отличием является размещение приемника излучения в интегрирующей сфере для снижения влияния турбулентности воздуха [21].

Величина пропускания излучения лазера  $T_\lambda$  водяным паром находилась из обычного для двухлучевой схемы отношения интенсивностей излучения, прошедшего через кювету с исследуемым газом и вакуумированную, с нормировкой на мощность источника.

### Континуум водяного пара

Результаты исследований континуума при помощи многоходовых кювет [4–6] были обобщены в [15] и представлены в виде следующей модели:

$$\tau_\lambda = LC_s \omega [p + \gamma (P - p)]; \quad (1)$$

$$C_s = C_s(\theta = 296) \exp [\theta_0 (1/\theta - 1/296)]; \quad (2)$$

$$C_s(296) = a + b \exp(-\beta\nu), \quad (3)$$

где  $\tau_\lambda = -\ln T_\lambda$  – оптическая толщина;  $L$  – длина пути;  $p$  и  $P$  – парциальное давление водяного пара и общее давление среды;  $\omega$  – количество молекул водяного пара в единице объема;  $\Theta$  – температура среды;  $\Theta_0 = 296^\circ\text{K}$  – начальная температура, при которой измерен коэффициент поглощения  $C_s$ ;  $\nu$  – волновое число;  $\nu = 1/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны, остальные – параметры подгонки.

Аппроксимации (1)–(3) включены для расчета континуального поглощения водяного пара в широко используемые и постоянно дополняемые программы расчета на ЭВМ поглощения излучения в атмосфере LOWTRAN [22]. Результаты последующих лабораторных и натуральных исследований, как правило, сопоставляются с расчетами по (1)–(3), т.е. с данными работ [4–6] или с [9], где приведены значения  $C_s$  и  $\gamma$  для 27 линий <sup>12</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub>-лазера, измеренные одновременно при помощи спектрофона и многоходовой кюветы.

Альтернативная модель континуума предложена в наших работах семидесятых годов [23–26]:

$$\tau_\lambda = Lf(\lambda) [k_1 a (1 + aP) + k_2 a^2 \exp(-\Delta H/R\theta)], \quad (4)$$

$$f(\lambda) = b_0 + b_1 \exp(-b_3/\lambda), \quad (5)$$

где  $L$  – длина пути;  $a$  – абсолютная влажность;  $P$  – общее давление;  $\theta$  – температура; остальные – параметры подгонки.

Сопоставления данных разных авторов, выполненные в [13, 15, 16, 17, 26], показывают, что при больших влажностях и на длинных трассах величины пропускания, рассчитанные по аппроксимационным выражениям и данным разных авторов, различаются на 20–30%. Аппроксимационные выражения (1) и (4) имеют принципиальные различия в виде зависимости от концентрации водяного пара и общего давления. Кроме того, формула (4) вследствие неодноточности  $\text{CO}_2$ -лазера, с которым получены экспериментальные данные для аппроксимации (4), дает завышенные на 7–15% значения поглощения. (Спектр лазера включал линию P16, испытывающую заметное селективное поглощение водяным паром). Эти обстоятельства также побуждали нас к проведению новых экспериментов.

### Усовершенствованная модель континуума

Выбор конкретных лазерных линий для исследований континуума был проведен на основе предварительного анализа спектра поглощения так, чтобы вблизи частот генерации  $\text{CO}_2$ -лазеров не находилось заметных линий поглощения водяного пара. Всего было выбрано 76 линий трех изотопов углекислого газа  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ,  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$  и  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$ . В опытах абсолютная влажность изменялась от 0,5 до 25 г/м<sup>3</sup>, общее давление — от 0 до 1,6 атм, температура — от 284 до 353°К. Длина пути чаще всего составляла 3 км.

Прежде чем перейти к рассмотрению конкретных результатов экспериментов, сделаем одно замечание. В натуральных экспериментах и лабораторных опытах с использованием кювет измеряется величина пропускания излучения. Эта же величина пропускания используется при решении большинства задач атмосферной оптики и геофизики, где анализируется распространение излучения в атмосфере. Даже при измерении коэффициента поглощения оптико-акустическим способом в основе лежит градуировка по известному коэффициенту поглощения, который находят по измеренному пропусканию соответствующего излучения соответствующим поглотителем. Поэтому в дальнейшем результаты и их анализ, как правило, будут представлены в величинах пропускания.

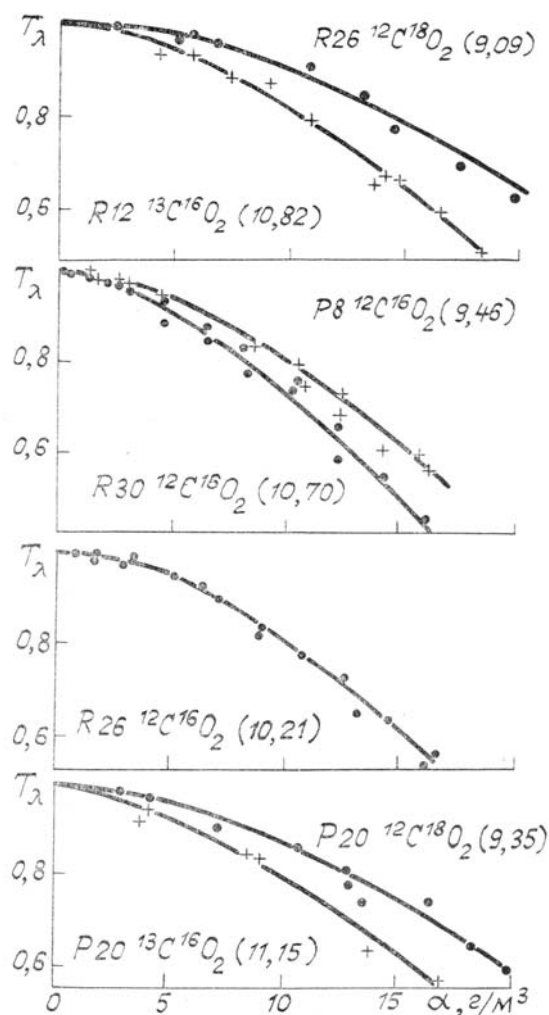


Рис. 1. Пропускание излучения  $\text{CO}_2$ -лазеров водяным паром. (В скобках на этом рисунке и на последующих указаны длины волны излучения, мкм)

Результаты измерения пропускания излучения различных линий лазера на изотопах  $\text{CO}_2$  чистым водяным паром на трассе 3 км при постоянной температуре приведены на рис. 1. Анализ результатов измерений показывает, что зависимость поглощения излучения  $\text{CO}_2$ -лазера водяным паром от парциального давления водяного пара имеет один и тот же характер для всего исследованного диапазона длин волн 9–11 мкм. Поглощение излучения  $\text{CO}_2$ -лазера в этом интервале длин волн зависит от парциального давления нелинейно.

Полученные данные обрабатывались методом наименьших квадратов в предположении различных видов зависимости поглощения от влажности. Наилучшей оказалась зависимость вида (4), причем уже при  $a > 1,2 \text{ г/м}^3$  и  $\theta = 293^\circ\text{K}$  и при  $a > 2,6 \text{ г/м}^3$  и  $\theta = 323^\circ\text{K}$  квадратичная часть становится больше линейной, т.е. отличие от чисто квадратической зависимости типа (1), полученной в [4–6], невелико. Причиной необнаружения в [4–6] малой линейной части является, по-видимому, то, что реализованные в них оптические пути в 3–6 раз короче, чем в наших исследованиях.

Все исследователи отмечают, что уширяющее давление непоглощающего газа слабо влияет на величину континуального поглощения водяного пара и определение количественных значений связано с техническими трудностями. Поэтому все ранние опыты проводились при одном уширяющем давлении 1 атм, что не позволило, как уже указано выше, достаточно однозначно определить его количественную величину. Самая длинная трасса, реализованная в настоящих исследованиях, дала возможность выполнить измерение при различных давлениях уширяющего газа и разных температурах. Пример полученных результатов представлен на рис. 2. Так, при постоянной температуре 293 К и влажности около  $10 \text{ г/м}^3$  пропускание излучения смесью водяного пара с азотом уменьшается на 2,5–9% по сравнению с чистым водяным паром при возрастании уширяющего давления до 1,3 атм. Другими словами, при постоянной концентрации водяного пара увеличение давления уширяющего газа примерно в 50 раз изменяет пропускание всего на несколько процентов, что во много раз меньше, чем это следует из дисперсионного контура линий поглощения.

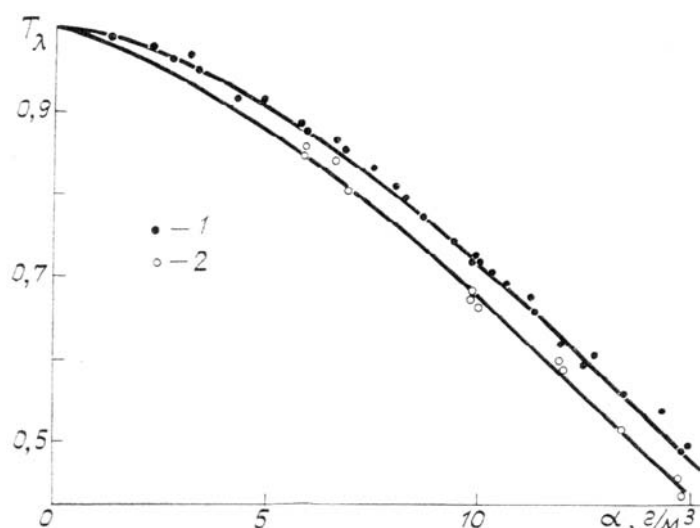


Рис. 2. Пропускание излучения линии P20 (10,59 мкм)  $\text{CO}_2$ -лазера водяным паром и смесью его с азотом при общем давлении 1 атм (1 — чистый водяной пар, 2 — водяной пар с азотом)

Результаты измерения пропускания излучения некоторых линий  $\text{CO}_2$ -лазера при различных температурах приведены на рис. 3 и 4. Как видно из рисунков, с ростом температуры пропускание увеличивается. При этом тщательный анализ многочисленных данных измерений показал, что в (4) от температуры зависит не только  $k_2$ , но и  $k_1$ . Причем в отличие от  $k_2$ ,  $k_1$  растет с увеличением температуры. Этот экспериментальный факт согласуется с предсказаниями [6] и [24] о зависимости от температуры  $k_1$  и  $k_2$ , а также может служить объяснением отклонения от (2) температурной зависимости, наблюдаемой при  $\theta > 400^\circ\text{K}$  в [27].

Использованные в настоящих исследованиях  $\text{CO}_2$ -лазеры на различных линиях трех изотопов углекислого газа охватывают диапазон 9–11 мкм и представляют возможность изучить спектральную зависимость континуума. Учтя, что зависимость континуального поглощения от концентрации водяного пара, давления и температуры во всем исследованном диапазоне остается одинаковой, можно представить  $\tau_\lambda = f(\lambda)/\tau_{10,6}$  ( $\tau_\lambda$  и  $\tau_{10,6}$  — оптические толщины для длины волны  $\lambda$  и 10,6 мкм соответственно;  $f(\lambda)$  — множитель, зависящий от длины волны и равный единице при  $\lambda = 10,6$  мкм). Следуя предсказаниям теоретических исследований об экспоненциальной спектральной зависимости поглощения [28], была найдена следующая аппроксимация:

$$f(\lambda) = b_0 \exp\left(\frac{\lambda^3}{b_1 + b_2 \lambda^3}\right), \quad (6)$$

где  $b_0 = 0,297$ ;  $b_1 = 800$  и  $b_2 = 0,15$ .

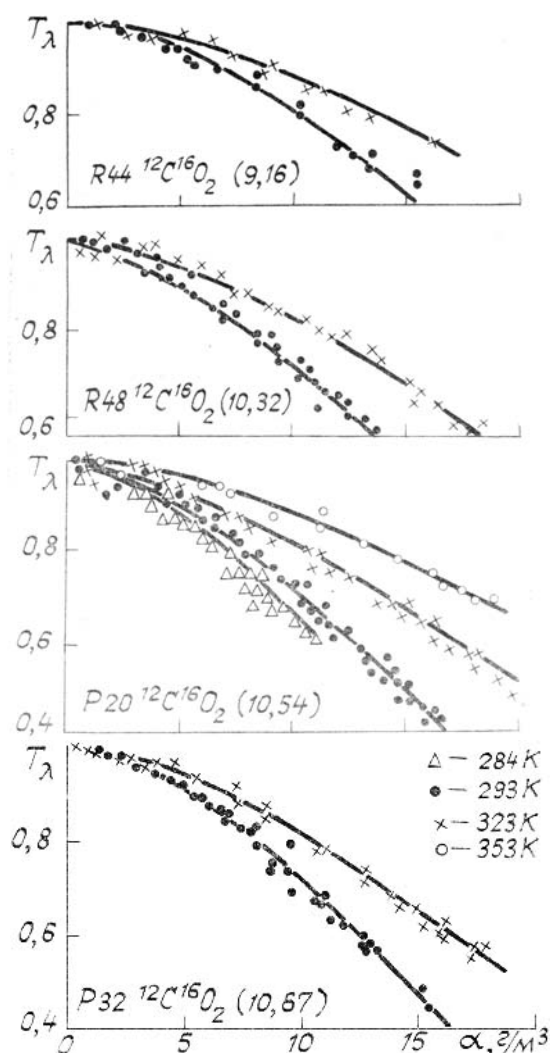


Рис. 3. Пропускание излучения  $\text{CO}_2$ -лазеров водяным паром при различных температурах

На основе описанных выше закономерностей формула уточненной модели континуума водяного пара может быть представлена в следующем виде:

$$T_\lambda = \exp \{ f(\lambda) L [k_1 a \theta^n (1 + \alpha P) + k_2 a^2 \exp(H/\theta)] \}, \quad (7)$$

где  $a$  — абсолютная влажность,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;  $P$  — общее давление,  $\text{атм}$ ;  $\theta$  — температура,  $\text{К}$ ;  $L$  — длина трассы,  $\text{км}$ ;  $f(\lambda)$  — по (6);  $\lambda$  — длина волны,  $\text{мкм}$ .

Параметры подгонки:  $k_1 = 0,22 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ г}^{-1} \text{ град}^{-3/2} \text{ км}^{-1}$ ;  $k_2 = 0,82 \cdot 10^{-6} \text{ м}^6 \text{ г}^{-2} \text{ км}^{-1}$ ;  $n = 1,5$ ;  $L = 1,95 \text{ атм}^{-1}$ ;  $H = 2066^\circ\text{К}$ . Расчеты по (7) показаны на рис. 1–4 сплошными кривыми.

Эта модель, так же как и предыдущая (4), описывает экспоненциальную зависимость континуального поглощения от длины волны, нелинейную зависимость от влажности, слабую зависимость от общего давления. Но температурная зависимость носит более сложный характер: квадратичный по влажности член выражения (7) имеет отрицательную зависимость от температуры, т.е. поглощение уменьшается с ростом температуры, а линейный — положительную.

Предложенная на основании лабораторных экспериментов модель непрерывного поглощения излучения водяным паром не дает возможности однозначно определить механизмы образования этого поглощения. Изложенные в настоящей статье экспериментальные факты в определенной степени являются лишь доводом в пользу гипотезы о действии в спектральном интервале 8–13  $\text{мкм}$  двух механизмов поглощения. Первый из них, описываемый второй частью выражения (7), указывает на то, что важную роль играет поглощение излучения парами близкосталкивающихся поглощающих молекул (в самом предельном случае — димерами). На это указывают нелинейная зависимость поглощения от давления водяного пара; относительно сильная отрицательная температурная зависимость

непрерывного поглощения водяного пара; близость параметра подгонки  $H(H = -\frac{\Delta E}{R})$  к величине энергии связи димера водяного пара  $\Delta E$  и слабая зависимость поглощения от давления ушибряющего газа.

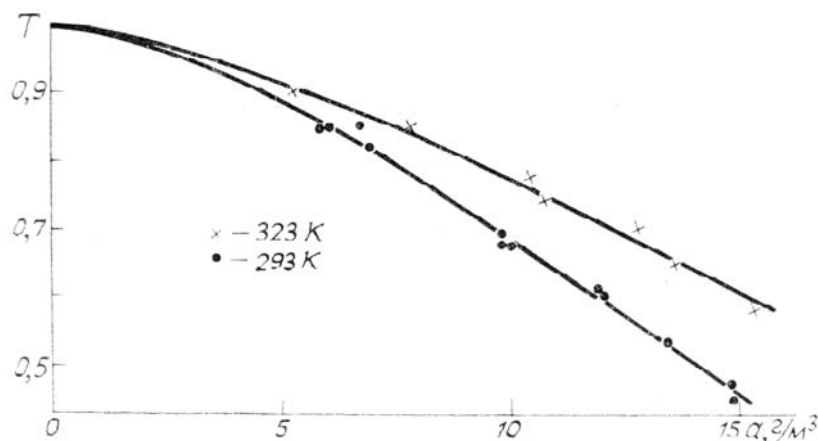


Рис. 4. Пропускание излучения линии P20 (10,59 мкм) CO<sub>2</sub>-лазера водяным паром с азотом при разных температурах

Второй механизм характеризуется линейной зависимостью от влажности, относительно слабой положительной температурной зависимостью при относительно сильной зависимости от общего давления — первая часть выражения (7). Такой механизм характерен для далеких столкновений поглощающих с непоглощающими молекулами, т.е. для близких крыльев слабых линий поглощения водяного пара, которые имеются в области 8–13 мкм.

Модель непрерывного поглощения водяного пара (7) применима, строго говоря, для условий изменения физических параметров, при которых проводились лабораторные эксперименты. Причем реализованные в этих экспериментах величины влажности водяного пара и давления ушибряющего газа перекрывают условия, встречающиеся в тропосфере Земли. В экспериментах не охвачена область отрицательных по шкале Цельсия температур, и для распространения данной модели на эти температуры нужно дополнительное обоснование, которое необходимо также для экстраполяции данных, полученных в спектральном интервале 9–11 мкм, на все окно прозрачности 8–13 мкм. Это можно сделать путем сопоставления модели с данными других лабораторных экспериментов.

Прежде чем проводить сопоставление, необходимо высказать ряд соображений по способам измерений и сравнению результатов. Известно, что к настоящему времени лабораторные данные о поглощении излучения CO<sub>2</sub>-лазера в континууме водяного пара получены двумя способами: с помощью спектрофонов и многоходовых кювет. В спектрофонах исследуют небольшой объем изучаемой газовой среды и коэффициент поглощения определяют с относительно малыми случайными погрешностями измерений. Однако необходимость предварительной градуировки прибора, методы которой различны у разных исследователей, может приводить к заметным систематическим ошибкам. Случайные ошибки кюветных измерений несколько больше, но систематические погрешности сведены к минимуму, т. к. измеряются абсолютные значения пропускания. В большинстве случаев численные результаты измерений и в кюветных исследованиях представляются в форме коэффициента поглощения при различных видах зависимости его от парциального давления водяного пара, температуры и общего давления среды. Различие видов этих зависимостей и разные условия экспериментов затрудняют сопоставление результатов. Поэтому, а также учитывая, что для решения большинства практических задач необходимо знание величин пропускания, сопоставление результатов будем проводить по этим величинам, причем в отличие от [16] не приводя все данные к единым условиям, а вычисляя пропускание по (7) для конкретных условий каждого эксперимента.

Расчеты пропускания излучения линий P20 (10,6 мкм) CO<sub>2</sub>-лазера водяным паром, выполненные по аппроксимационным формулам разных авторов, представлены на рис. 5, из которого следует, что они согласуются с расчетами пропускания по (7). Причина различия с [24], откуда взято выражение (4), указана выше.

На рис. 6 показаны результаты расчетов по (7) и измерений разных авторов для многих линий перестраиваемых CO<sub>2</sub>-лазеров. В рассмотрение не включены линии, перекрывающиеся с линиями поглощения водяного пара. Кроме того, можно не учитывать те обведенные на рисунке кружками линии, на поглощение излучения которых заметное влияние оказывает аммиак. Даже результаты [8], где внесены поправки на аммиак, согласуются с расчетами хуже, чем другие. По-видимому, поправки на аммиак в [8] недостаточно точны. Несколько более заметный разброс и небольшое систематическое смещение данных [11] от расчета связано, скорее всего, с погрешностями градуировки спектрофона в

[11]. В целом рис. 5 демонстрирует хорошее согласие расчетов и экспериментов и, следовательно, возможность использования (7) в широком спектральном диапазоне от  $845 \text{ см}^{-1}$  ( $\sim 11,8 \text{ мкм}$ ) до  $1085 \text{ см}^{-1}$  ( $\sim 9,2 \text{ мкм}$ ).

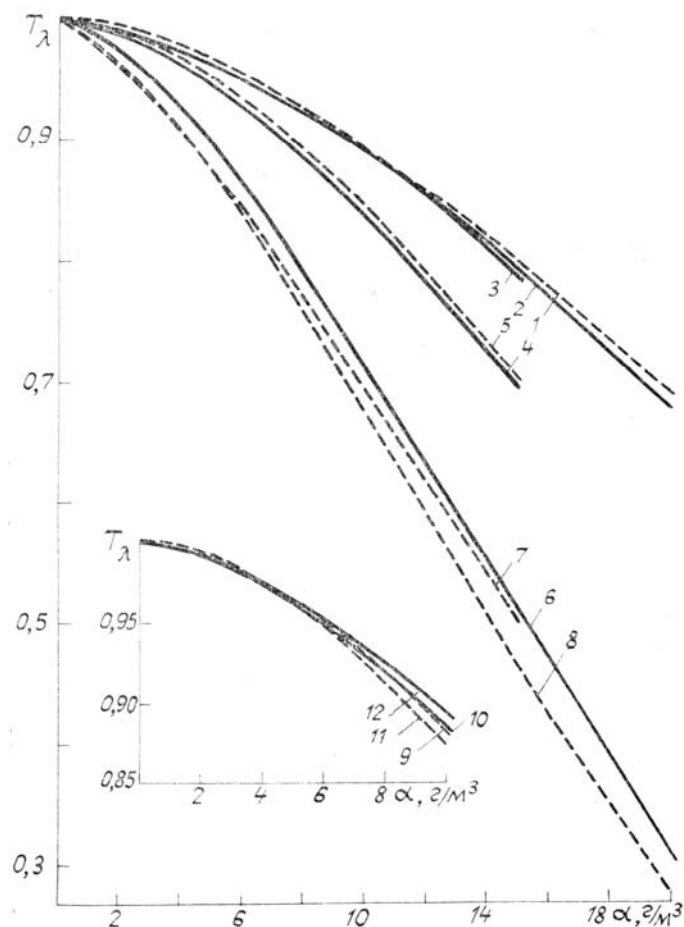


Рис. 5. Пропускание излучения линии P20 ( $10,59 \text{ мкм}$ )  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера по аппроксимациям разных авторов (1, 3 – [12] и [11] соответственно при  $\theta = 296^\circ\text{K}$  для  $\alpha = 1 \text{ км}$ ; 5 – [9],  $296,5^\circ\text{K}$ ,  $1,5 \text{ м}$ ; 7, 8 – [8] и [24],  $300^\circ\text{K}$ ,  $3 \text{ км}$ ; 9 – [4],  $296^\circ\text{K}$ ,  $0,98 \text{ км}$ ; 11 – [10],  $300^\circ\text{K}$ ,  $1 \text{ км}$ ; 2, 4, 6, 10, 12 – расчет по (7) для указанных выше конкретных условий эксперимента каждого автора)

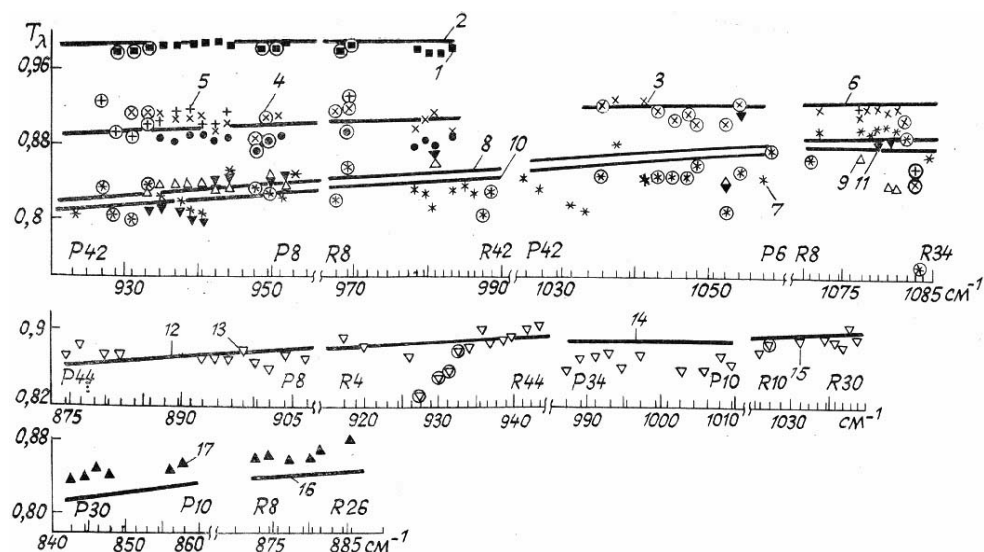


Рис. 6. Пропускание излучения разных линий  $\text{CO}_2$ -лазеров по данным разных авторов: 1 – [10],  $P = 1,68 \text{ Торр}$ ,  $\theta = 263^\circ\text{K}$ ,  $L = 1 \text{ км}$ ; 3, 4, 5 – [8], [10],  $10 \text{ торр}$ ,  $300^\circ\text{K}$ ,  $1 \text{ км}$ ; 7 – [11],  $296^\circ\text{K}$ , 9 – кювета [9],  $295,5^\circ\text{K}$ ; 11 – спектрофон [9],  $298^\circ\text{K}$ , все при  $10 \text{ Торр}$ ,  $1,5 \text{ км}$ ; 13, 15, 17 – [11],  $9,82$ ,  $10,65$  и  $10,94 \text{ Торр}$ ,  $296^\circ\text{K}$ ,  $1 \text{ км}$ ; 2, 6, 8, 10, 12, 14, 16 – расчет по (7); 12–15–  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазер; 17 –  $^{14}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазер, остальные  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазер; 9, 11 – смесь водяного пара с азотом, остальные – влажный воздух при общем давлении  $1 \text{ атм}$

Возможность экстраполяции выражения (7) на все окно прозрачности 8–13 мкм иллюстрирует рис. 7, где расчеты по (7) хорошо согласуются с данными [5] и [6] для области 8–13 мкм. Более сильное поглощение в микроокне 8,94 мкм по [6] связано с возможностью вклада других поглощающих газов (в [6] исследован искусственно осушаемый или увлажняемый воздух) и более низким разрешением  $2,4 \text{ см}^{-1}$ , использованным для окна 8,94 мкм, по сравнению с  $0,3–0,5 \text{ см}^{-1}$  для микроокон 11,1; 12,01 и 12,67 мкм.

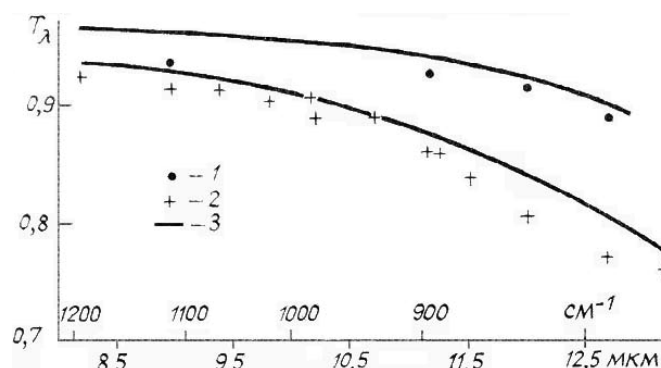


Рис. 7. Пропускание излучения различных длин волн: 1—[6], влажный воздух при  $303^\circ\text{K}$ ; 2—[5], уточненные в [15] при  $296^\circ\text{K}$ ; 3— расчеты по (7) при  $P = 10 \text{ Торр}$ ,  $P = 1 \text{ атм}$ ,  $L = 1 \text{ км}$  и температурах  $303$  и  $296^\circ\text{K}$

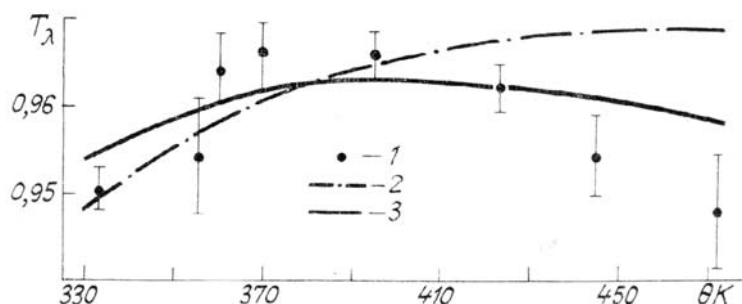


Рис. 8. Пропускание излучения диодного лазера водяным паром при разных температурах: 1—[27], 2, 3—расчеты по (2) и (7) соответственно,  $\nu = 1203 \text{ см}^{-1}$ ,  $a = 10 \text{ г/м}^3$ ,  $L = 1 \text{ км}$

На рис. 8 приведено сопоставление расчетов по (7) с лабораторными данными [27], полученными с диодным лазером на  $\nu = 1203 \text{ см}^{-1}$  в диапазоне температур  $333–473^\circ\text{K}$ . Из рис. 8 видно, что предложенная модель континуума качественно и удовлетворительно количественно описывает данные [27].

Таким образом, сравнение с результатами лабораторных работ разных авторов (рис. 5–8) показало, что предложенная модель непрерывного поглощения излучения водяным паром описывает данные, полученные разными авторами в естественном и искусственном воздухе во всем спектральном диапазоне 8–13 мкм при различных температурах.

### Селективное поглощение водяного пара

В настоящее время считается общепризнанным, что в условиях тропосферы Земли коэффициент селективного поглощения может быть рассчитан с помощью лоренцевского (дисперсионного) контура линий:

$$K_\lambda = \frac{S_{ij} \alpha_{ij}}{\pi [(\nu - \nu_{ij})^2 + \alpha_{ij}^2]}, \quad (8)$$

$$S_{ij} = S_0 \left( \frac{\theta_0}{\theta} \right)^m \exp \left[ \frac{E_{ij}}{k\theta_0} \cdot \frac{\theta - \theta_0}{\theta} \right], \quad (9)$$

$$\alpha_{ij} = \left( \frac{\theta_0}{\theta} \right)^n [\alpha_0 (P - p) + \sigma p] = \alpha_0 \left( \frac{\theta_0}{\theta} \right)^n [(B - 1)p + P], \quad (10)$$

где  $S_{ij}$  и  $S_0$ ,  $\alpha_{ij}$  и  $\alpha_0$  — интенсивности и полуширины при температурах  $\theta$  и  $\theta_0$ , а  $E_{ij}$  и  $\nu_{ij}$  — энергия нижнего вращательного уровня и волновое число;  $j$  — линии поглощения  $i$ -газа;  $\nu = 1/\lambda$  — волновое



число, для которого рассчитывается коэффициент поглощения  $k_\lambda$ ;  $P$  и  $p$  — общее и парциальное давления;  $m$  и  $n$  — температурные параметры;  $B$  — отношение коэффициента самоуширения  $\alpha$  к коэффициенту уширения  $\alpha_0$ , измеренного при  $\theta_0$ ,  $k$  — постоянная Больцмана.

Для вычисления полного коэффициента поглощения на заданной длине волны (волновом числе) выражение (8) суммируется по  $j$  и  $i$ , т. е. по газам и их линиям, вносящим вклад в поглощение на длине волны  $\lambda$ . Такой метод расчета (*line by line*) получил широкое распространение во всем мире. Для его реализации создаются специальные атласы (компиляции), содержащие необходимые спектроскопические параметры линий поглощения [30–32]. Они постоянно уточняются и дополняются новыми данными. Однако в некоторых случаях, для лазерных линий особенно, точность задания параметров в этих компиляциях оказывается недостаточной [33–34] и возникает необходимость их экспериментального уточнения.

В области 8–13 мкм к настоящему времени известно около 1150 линий поглощения водяного пара, принадлежащих, в основном, его чисто вращательной и фундаментальной  $\nu_2$  полосам. В спектре линии расположены хаотически и часть из них совпадает с линиями генерации  $\text{CO}_2$ -лазеров. Излучение таких лазеров испытывает в атмосфере сильное поглощение, складывающееся из континуального и селективного поглощений водяного пара. Механизмы и закономерности этих двух видов молекулярного поглощения различны. Используя модель континуума, предложенную выше, коэффициент селективного поглощения по измеренному пропусканию определяется по формулам:

$$K_c = \frac{(-\ln T_\lambda) - (\ln T_\lambda^K)}{W}, \quad (11)$$

$$W = L \frac{P}{P_0} \frac{\theta_{00}}{\theta}, \quad (12)$$

где  $W_{(\text{атм. см})}$  — содержание водяного пара на трассе  $L$  (см), приведенное к нормальным условиям ( $P_0 = 1$  атм,  $\theta_{00} = 273^\circ\text{K}$ );  $T_\lambda^K$  — вычисляется по (7).

На рис. 9 представлены результаты измерений коэффициента поглощения излучения лазера на линии R20 ( $\lambda = 10,25$  мкм) основного изотопа углекислого газа при различных парциальных и общих давлениях. Линия R20 совпадает с линией поглощения водяного пара  $13_{-5} \text{---} 12_{-11}$ . Кривые 4, 5 на рис. 9 — расчет с параметрами этой линии поглощения из [30]. Видно, что по мере уточнения параметров в последующих версиях [30] результаты эксперимента и расчета сближаются. Однако полного согласия не наблюдается в первую очередь потому, что в расчете не учтено самоуширение. Хотя в версии 1986 г. [30] коэффициент самоуширения для некоторых газов приводится, для линий водяного пара он пока отсутствует.

На рис. 10 показаны результаты измерений при двух температурах 293 и 323°K. Температурная зависимость изучалась в [10] и [12]. В [10] получено согласие с [30], где  $E_{i,j} = 1557,85 \text{ см}^{-1}$ , а в [12] найдено, что  $E_{i,j} = 1619 \text{ см}^{-1}$ . Приняв  $E_{i,j}$  по [30] и заимствуя из [30] значение полуширины линии  $\alpha_0$ , методом наименьших квадратов из всей совокупности экспериментальных данных были определены остальные параметры линии поглощения  $13_{-5} \text{---} 12_{-11}$  (таблица), расчеты которых показаны на рис. 9 и 10 сплошными кривыми. (Попытка зафиксировать значение интенсивности линии или расстояния между линиями генерации и поглощения привела к неразумным величинам  $\alpha_0$ , превосходящим  $0,5 \text{---} 1 \text{ см}^{-1}$ ).

Опубликованные результаты измерений коэффициента поглощения для R20 [8–13] получены при различных температурах от 253 до 345°K и парциальных давлениях от нескольких до десятков Торр, но при одном общем давлении 1 атм (или  $\sim 1$  атм). Только в [35] коэффициент поглощения измерен при давлении 0,47 атм. Сопоставление опубликованных результатов с данными настоящей работы представлены на рис. 11 в виде функции регрессии между измеренными  $k_s$  и рассчитанными  $k_p$  коэффициентами поглощения. ( $k_p$  — сумма континуального и селективного поглощения, вычисленная по (7) и (8)). Как видно из рис. 11, в целом наблюдается удовлетворительное согласие. Некоторое отличие результата [35] от расчета (см. также рис. 9) прокомментировать невозможно из-за отсутствия каких-либо сведений о методике измерений в [35], где приведено лишь голое значение коэффициента. Более тщательный анализ данных рис. 11 показывает, что наилучшее согласие наблюдается с данными [9], которые получены при помощи оптической многоходовой кюветы. Остальные результаты, полученные при помощи оптико-акустических спектрофонов, в пределах взаимных погрешностей согласуясь с расчетами, тем не менее демонстрируют наличие некоторых систематических отклонений, поскольку данные каждого автора группируются с одной или другой стороны линии регрессии. Эта систематика определяется различиями в калибровке спектрофонов [13]. Величина случайных погрешностей спектрофонных измерений чаще всего авторами не называется, но об их величине можно судить по разбросу значений при постоянной температуре (см., например, на рис. 11 данные [8] и [11]). Аналогичную картину для некоторых других линий  $\text{CO}_2$ -лазера иллюстрирует рис. 12.

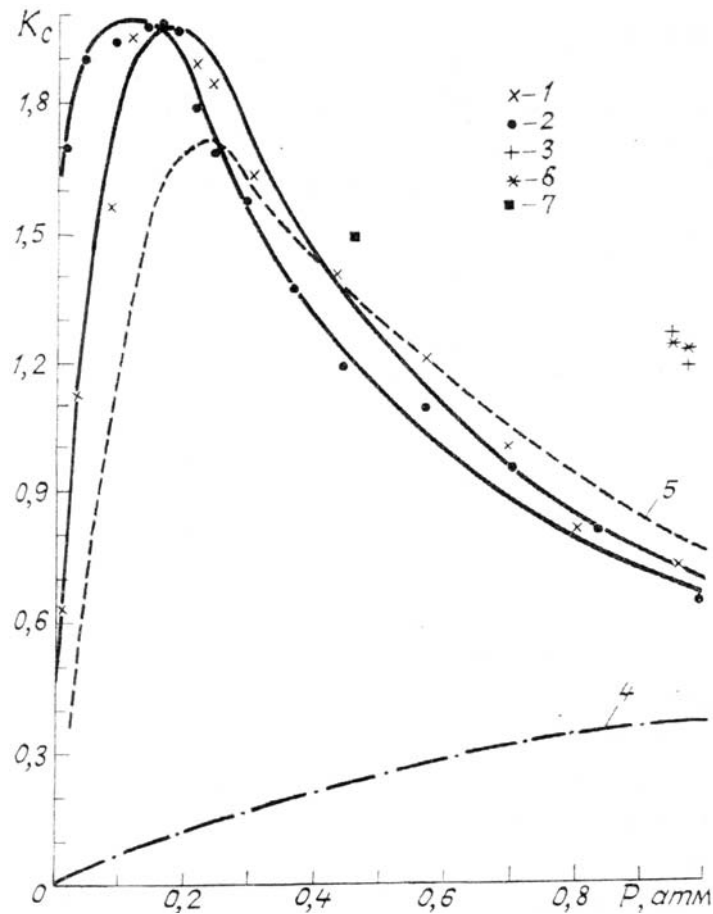


Рис. 9. Поглощение водяным паром излучения линии  $R20 \text{ }^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера при различных парциальных и общих давлениях. 1, 2 – эксперимент при 3,82 и 17,3 Торр, 295 К; 4, 5 – расчет с использованием параметров [30]; 3 – эксперимент при 10 Торр и 323 К; 4 – расчет при 10 Торр и 323 К с параметрами, найденными в данной статье; 7 – эксперимент [35] при 0,01 Торр, 293 К,  $P = 0,47$  атм;  $K_c - 10^3 (\text{атм} \cdot \text{см})^{-1}$

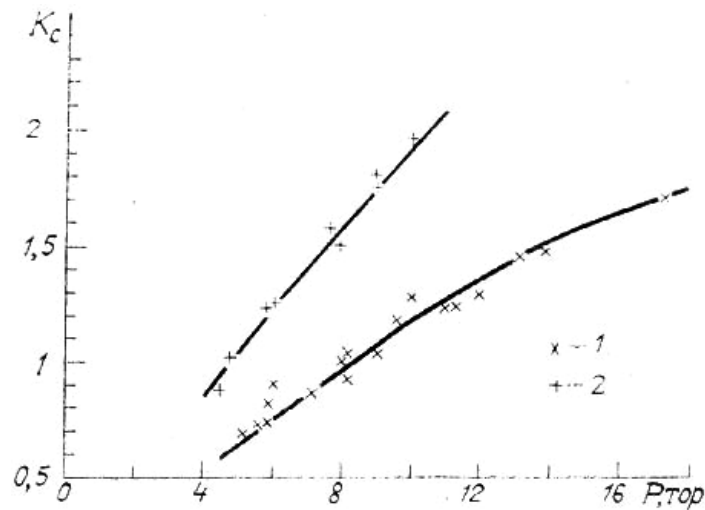


Рис. 10. Поглощение чистым водяным паром излучения линии  $R20 \text{ }^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера при разных температурах: 1 – 295°К; 2 – 323°К;  $K_c - 10^3 (\text{атм} \cdot \text{см})^{-1}$

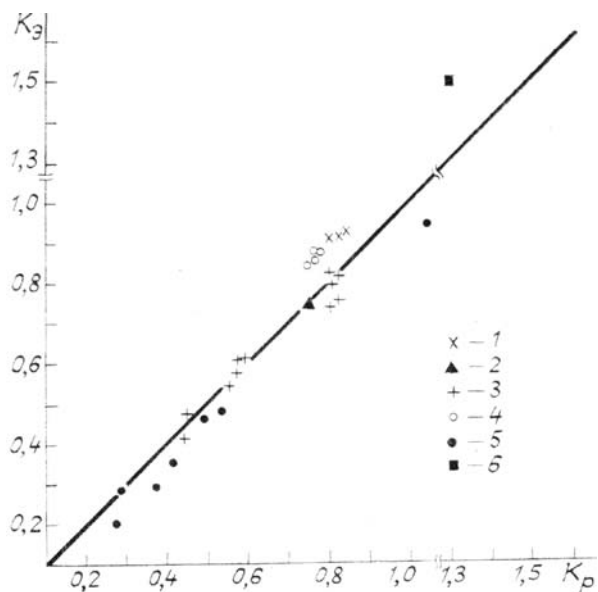


Рис. 11. Сравнение данных разных авторов по поглощению излучения линии P20  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера. 1—[8]; 2—[9]; 3—[10]; 4—[11]; 5—[12]; 6—[35];  $K_3$  и  $K_p$  —  $10^3$  (атм · см) $^{-1}$

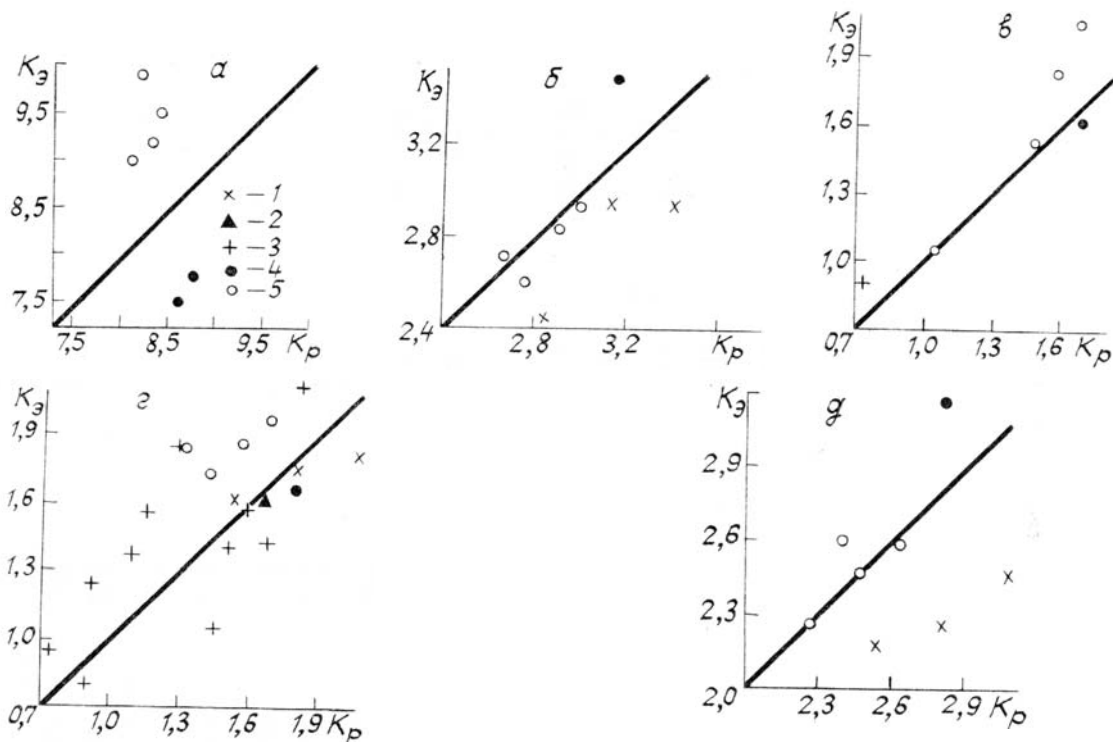


Рис. 12. Сравнение данных разных авторов по поглощению излучения разных линий  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера: а—P40 (10,81 мкм); б—R14 (9,31); в—P36 (10,76); г—R12 (10,30); д—R28 (9,62); 1—[8]; 2—[9]; 3—[10]; 4—[12]; 5—[11];  $K = 10^4$  (атм · см) $^{-1}$

Таблица содержит также параметры других линий поглощения водяного пара, перекрывающихся с линиями генерации углекислотных лазеров. При этом, однако, следует заметить, что полученные и приведенные в таблице спектроскопические параметры линий поглощения водяного пара применимы в первую очередь для расчетов поглощения излучения близлежащих лазерных линий. Они могут быть недостаточно точны в других случаях, поскольку методика их нахождения требовала априорного значения одного из параметров. Выбор фиксируемого параметра был в какой-то степени произвольным, хотя и подкреплялся стремлением к разумности получаемых значений находимых параметров.

Параметры линий поглощения водяного пара

Линия, полоса	Водяной пар					$\theta_0$	CO <sub>2</sub> -лазер		Лит. источник
	$\nu$ , см <sup>-1</sup>	$S \cdot 10^6$ , см <sup>-1</sup> (атм·см) <sup>-1</sup>	$\alpha_0 \cdot 10^3$ , см <sup>-1</sup>	$\alpha \cdot 10^3$ , см <sup>-1</sup>	$E$ , см <sup>-1</sup>		Линия, изотоп	$\nu$ , см <sup>-1</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13 <sub>-5</sub> →12 <sub>-11</sub>	975,9436	145	56,1	—	1557,85	296	R20	—	[30]
000—000	975,9406	126	56,0	250	1557,85	295	<sup>12</sup> C <sup>16</sup> O <sub>2</sub>	975,9304	н. с.*
9 <sub>5</sub> →8 <sub>-5</sub>	924,9880	262	46,0	—	885,60	296	P40	—	[30]
000—000	924,9880	210	85,0	340	885,60	295	<sup>12</sup> C <sup>16</sup> O <sub>2</sub>	924,9740	н. с.
8 <sub>-3</sub> →9 <sub>3</sub>	998,8100	56,5	57,0	—	1631,4	296	P22	—	[30]
010—000	998,8054	44,0	56,0	296	1631,4	294	<sup>13</sup> C <sup>16</sup> O <sub>2</sub>	998,7884	н. с.
13 <sub>-7</sub> →12 <sub>1</sub>	970,5705	14,7	36,4	—	2612,8	296	R12	—	[30]
000—000	970,5705	14,6	58,0	284	3663,4	293	<sup>12</sup> C <sup>16</sup> O <sub>2</sub>	970,5472	н. с.
14 <sub>3</sub> →13 <sub>-1</sub>	928,9857	21,5	429	—	2756,42	296	—	—	[30]
000—000	928,9857	11,1	426	193	2756,42	293	P36	929,0175	н. с.
9 <sub>-2</sub> →10 <sub>4</sub>	928,9550	2,15	535	—	2054,36	296	—	—	[30]
010—000	928,9550	1,11	532	241	2054,36	293	<sup>12</sup> C <sup>16</sup> O <sub>2</sub>	—	н. с.
9 <sub>-5</sub> →10 <sub>-1</sub>	1099,6801	489,6	62,5	—	1718,72	296	R24	—	[30]
010—000	1099,6801	825,0	62,2	351	1718,72	294	<sup>12</sup> C <sup>18</sup> O <sub>2</sub>	1099,4648	н. с.
16 <sub>-3</sub> →7 <sub>3</sub>	1100,9770	1,15	65,4	—	1051,21	296	R26	—	[30]
010—000	1100,9770	1,15	65,1	—	1051,21	294	<sup>12</sup> C <sup>18</sup> O <sub>2</sub>	1100,5928	н. с.
6 <sub>-3</sub> →7 <sub>3</sub>	1101,4510	530	66,3	—	1059,84	296	R28	—	[30]
010—000	1101,4510	740	66,0	388	1059,84	294	<sup>12</sup> C <sup>18</sup> O <sub>2</sub>	1101,7014	н. с.
10 <sub>-7</sub> →11 <sub>-5</sub>	1091,2061	562	60	—	1813,22	296	R10	—	[30]
010—000	1091,2061	750	59,7	311	1813,22	294	<sup>12</sup> C <sup>18</sup> O <sub>2</sub>	1091,0247	н. с.
9 <sub>-8</sub> →10 <sub>-6</sub>	1074,4091	385	46,5	—	1437,97	296	R14	—	[30]
010—000	1074,4091	841	46,2	223	1437,97	293	<sup>12</sup> C <sup>16</sup> O <sub>2</sub>	1074,6465	н. с.
11 <sub>-7</sub> →12 <sub>-3</sub>	1039,4840	675	36,9	—	2275,37	296	—	—	[30]
010—000	1039,4840	151,3	36,7	171	2275,37	293	P28	—	н. с.
8 <sub>-2</sub> →9 <sub>2</sub>	1039,5410	28,5	80,0	—	1631,25	296	<sup>12</sup> C <sup>16</sup> O <sub>2</sub>	1039,3694	[30]
010—000	1039,5410	64,2	19,7	341	1631,25	293	—	—	н. с.

\* Н. с. — настоящая статья.

## Результаты натуральных исследований

Опубликованные к настоящему времени работы, содержащие результаты измерений прозрачности атмосферы в окне 8–13 мкм в натуральных условиях, можно условно разделить на три группы.

В первой группе работ (см., например, [36–38]) авторы стремились обработать результаты натуральных наблюдений таким образом, чтобы выявить особенности континуального поглощения. Так, в [36, 37] приведены данные измерений ослабления солнечного излучения всей толщей атмосферы в диапазоне длин волн 0,65–13,5 мкм. Разделение результатов на группы по содержанию водяного пара, температуре, упругости водяного пара и горизонтальной дальности видимости позволило надежно выявить наличие температурной зависимости и двух компонент поглощения в окне 8–13 мкм, т. е. нелинейной зависимости поглощения от влажности.

В [38] по данным измерений противозлучения атмосферы в окне 8–13 мкм многоканальным радиометром проведен анализ относительного вклада аэрозоля, димеров и мономеров водяного пара в ослабление излучения. Показано, что в теплое время года (измерения проводились с марта по ноябрь) в низких и средних широтах преобладает вклад димерного поглощения.

Вторая многочисленная группа работ (см., например, [39–51]) содержит результаты натуральных наблюдений, как правило, отобранных по возможно минимальному вкладу аэрозоля. Эти результаты затем сопоставляются или с лабораторными данными непосредственно, или с расчетами по какой-нибудь модели. Общий для всех вывод: результаты согласуются. Согласие имеет качественный характер, так как обычно сравнивают весь массив экспериментальных натуральных данных с аппроксимационной зависимостью, полученной в лабораторных опытах. В [47] предложен осуществленный затем в ряде работ (см., например, [48–51]) количественный метод сравнения, заключающийся в сопоставлении экспериментальных результатов с данными интегрирования на пути луча выражения (4) при значениях параметров атмосферы, определяемых одновременно с каждым оптическим измерением. Хотя выражение (4), как показано в предыдущем параграфе, несколько завышает величину континуального поглощения водяного пара, остаются в силе общие выводы этих работ о необходимости учета в расчетах реальных высотных профилей температуры, давления, влажности и в области 8–10 мкм молекулярного поглощения других составляющих атмосферы.

Третья группа работ (см., например, [52–62]) посвящена исследованиям аэрозольного ослабления в области окна 8–13 мкм после исключения континуального поглощения из полного ослабления. Методы исключения используются различные: во-первых, расчеты по аппроксимационным лабораторным формулам континуального поглощения и вычитание его из полного ослабления (см., например, [53]); во-вторых, вычитание ослабления, измеренного в особо чистых, безаэрозольных условиях при дальности видимости более нескольких десятков километров (см., например, [54]); в-третьих, разделение вкладов разных факторов путем статистического анализа (см., например, [57]); в-четвертых, исключение минимальных наблюдаемых значений (см., например, [55]).

Как упомянутые выше, содержащие результаты натуральных опытов публикации, список которых далеко не полон, так и другие работы не содержат всех конкретных данных, необходимых для проведения расчетов по модели (7). Поэтому расчеты по (7) ниже сопоставлены с данными собственных измерений на горизонтальной, открытой многоходовой трассе и с доступными нам данными измерений ослабления солнечного излучения атмосферой в Антарктиде [49].

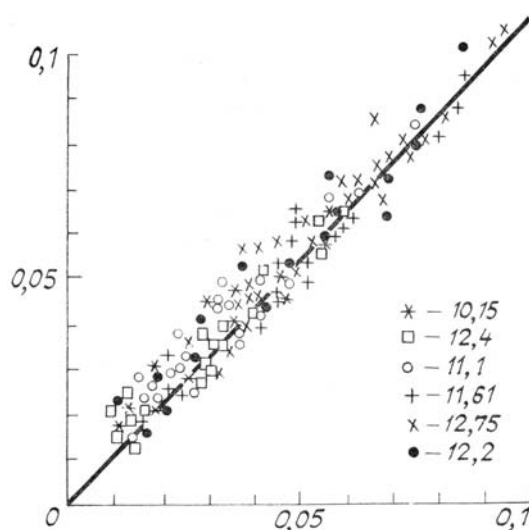


Рис. 13. Сравнение данных измерений поглощения атмосферой излучения 10–13 мкм в Антарктиде с расчетами: 1 – 10,15; 2 – 10,4; 3 – 11,1; 4 – 11,6; 5 – 12,75; 6 – 12,2 мкм

Напомним, что измерения в Антарктиде проводились с помощью полевого спектрального комплекса аппаратуры [63] в условиях устойчивых антициклональных ситуаций при предельно малом содержании аэрозоля, которое контролировалось по синхронным оптическим наблюдениям ослабления излучения в видимой области спектра. В среднем это ослабление лишь на 10% превышало рэлеевское. Существенно, что между оптическими толщами в инфракрасном и видимом диапазонах спектра корреляции не обнаружено [49, 50].

Функция регрессии между оптическими толщами  $\tau_p$ , рассчитанными по (7) с использованием данных аэрологического зондирования, и экспериментально измеренными в Антарктиде  $\tau_s$ , представлена на рис. 13. Для сравнения выбраны микроокна прозрачности в области 10–13 мкм, которые более свободны от молекулярного поглощения других составляющих атмосферы. Как видно из рис. 13, согласие между  $\tau_s$  и  $\tau_p$  можно считать хорошим. Небольшое превышение  $\tau_s$  над  $\tau_p$ , составляющее около 0,01 и находящееся, строго говоря, в пределах погрешностей измерений, по-видимому, может быть связано с молекулярным поглощением других составляющих атмосферы и с указанным выше 10%-ным фоновым аэрозольным ослаблением.

На горизонтальной, приземной, многоходовой трассе измерено пропускание  $T_s$  воздухом излучения лазеров на трех изотопах углекислого газа (около 70 линий) в различные сезоны года при изменениях влажности от 0,5 до 12 г/м<sup>3</sup>, температуры от –22 до 26°C. Одновременно контролировалась метеорологическая дальность видимости  $S_m$  и концентрация углекислого газа, которая для места наблюдений, не свободной от локальных источников углекислого газа, составляла 340–370 миллионных долей по объему. Для других малых составляющих атмосферы, если они оказывали влияние на поглощение излучения той или иной линии CO<sub>2</sub>-лазера, использованы средние фоновые значения их концентраций [64].

Все результаты измерений  $T_s$  сгруппированы в три ансамбля по величинам дальности видимости:  $S_m > 20$  км,  $10 < S_m < 20$  км и  $S_m < 10$  км. На рис. 14 представлены функции регрессии между  $T_s$  и  $T_p$ , рассчитанным с учетом непрерывного и селективного молекулярного поглощения водяного пара и других газов воздуха для девяти линий изотопных CO<sub>2</sub>-лазеров. Так, например, для линий P34 <sup>12</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub>-лазера учтено поглощение двуокиси серы, для P38 – аммиака, для остальных линий основного изотопа – углекислого газа и т.д. Штриховые линии ограничивают зону средних квадратических погрешностей. Из рис. 14 следует, что при  $S_m > 20$  км, когда в видимой области спектра роль аэрозоля мала, она, как правило, мала и в инфракрасной области спектра. Наблюдаемое ослабление излучения CO<sub>2</sub>-лазеров определяется практически полностью молекулярным поглощением и может быть с достаточной надежностью вычислено. Вместе с тем исследование причин встречающихся случаев сильного аэрозольного ослабления при большой дальности видимости остается интересной научной задачей. При  $S_m = 10–20$  км экспериментальное пропускание, как правило, меньше  $T_p$ , т.е. вклад аэрозольного ослабления становится заметным. При  $S_m < 10$  км различие между  $T_s$  и  $T_p$  становится еще более существенным и может достигать десятков процентов. При этом явно выраженной зависимости от сезонов года и длины волны излучения не обнаружено.

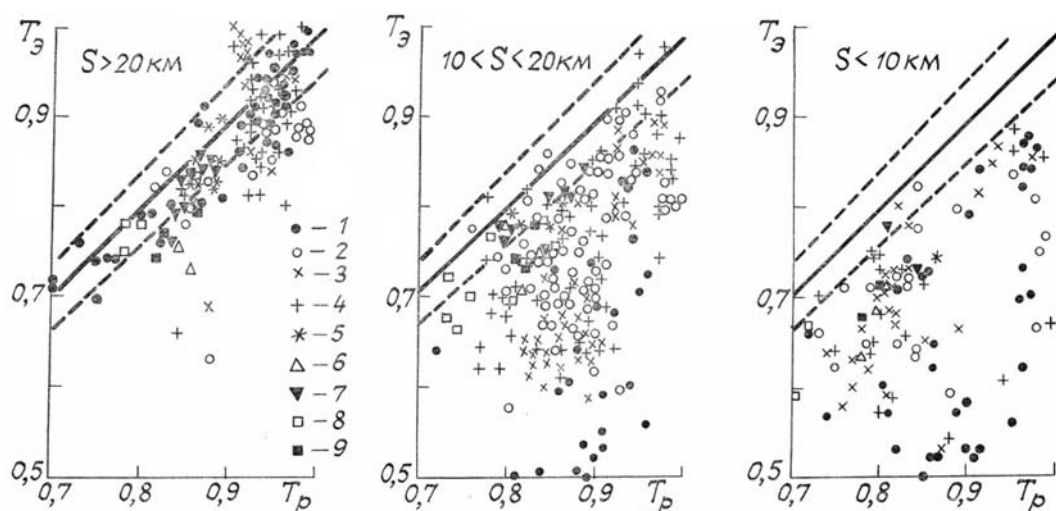


Рис. 14. Сопоставление данных измерений пропускания излучения CO<sub>2</sub>-лазеров на горизонтальной трассе с расчетами 1–4–P20 (10,59), R38 (10,14), R34 (9,20), P38 (10,79) <sup>12</sup>C<sup>14</sup>O<sub>2</sub>; 5, 7 – R20 (9,11), P22 (9,37) <sup>12</sup>C<sup>18</sup>O<sub>2</sub>; 6, 8, 9 – R22 (9,67), P24 (11,19), P24 (10,03) <sup>13</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub>-лазера

## Заклучение

Выполненные в натуральных и лабораторных условиях исследования молекулярного поглощения водяным паром излучения в окне относительной прозрачности атмосферы 8–13 мкм охватывают широкий диапазон изменения влияющих на поглощение параметров (общее и парциальное давление,

температура, влажность, дальность видимости, длина волны). Исследования подтвердили и уточнили основные закономерности и параметры континуального и селективного поглощения водяного пара.

Полученные результаты позволили сформулировать усовершенствованную полумпирическую модель континуума. Расчеты по этой модели хорошо согласуются с конкретными результатами других работ. Сопоставление расчетов с результатами натуральных опытов подтвердили важную роль континуума в ослаблении излучения в окне 8–13 мкм.

В случае лазерного излучения часто существенную роль играет селективное поглощение. В результате измерений определены спектроскопические параметры ряда линий поглощения водяного пара, перекрывающихся с линиями генерации CO<sub>2</sub>-лазера.

1. Fowle F. E. // *Astroph. J.* 1913. V. 38. № 5. P. 392–399.
2. Elsasser W. M. // *Phys. Rev.* 1938. V. 53. № 5. P. 768.
3. Bignell K. J., Saiedy F., Sheppard P. A. // *JOSA.* 1963. V. 53. № 4. P. 466–479.
4. McCoy J. H., Rensch D. D., Long R. K. // *Appl. Opt.* 1969. V. 8. № 7. P. 1471–1478.
5. Burch D. E. // *Semi-annual technical report U-4784 under contract NF 19628-68-C-0263.* 1970. 27 p.
6. Bignell K. J. // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 1970. V. 96. № 409. P. 390–403.
7. Varanasi P., Chou S., Penner S. S. // *JQSRT.* 1968. V. 8. № 8. P. 1537–1541.
8. Shumate M. C., Menzies R. T., Margolis J. S., Rosengren L. // *Appl. Opt.* 1976. V. 15. № 10. P. 2480–2488.
9. Peterson I. C., Thomas M. E., Nordstrom R. J., Damon E. K., Long R. K. // *Appl. Opt.* 1979. V. 18. № 6. P. 834–841.
10. Loper G. L. et al. // *Appl. Opt.* 1983. V. 22. № 23. P. 3701–3710.
11. Ryan J. S., Hubert M. H., Crane R. A. // *Appl. Opt.* 1983. V. 22. № 5. P. 711–718.
12. Hinderling J., Sigrist M. W., Кнеубюхе F. K. // *Infr. Phys.* 1987. V. 27. № 2. P. 63–120.
13. Meyer P. L., Sigrist M. W., Кнеубюхе F. K., Hinderling J. // *Infr. Phys.* 1987. V. 27. № 5. P. 345–347.
14. Антипов А. Б., Капитанов В. А., Пономарев Ю. Н., Сапожникова В. А. Оптико-акустический метод в лазерной спектроскопии молекулярных газов. Новосибирск: Наука, 1984. 128 с.
15. Roberts E. R., Seiby J. E. A., Viberman L. M. // *Appl. Opt.* 1976. V. 15. № 9. P. 2085–2090.
16. Арефьев В. Н. // *Метеорология и гидрология.* 1980. № 1. С. 97–112.
17. Парамонова Н. Н., Броунштейн А. М. О непрерывном ослаблении солнечной радиации в ИК-окнах прозрачности атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1980. С. 110–119.
18. White J. U. // *J. Opt. Soc. Amer.* 1942. V. 32. № 6. P. 285–288.
19. Арефьев В. Н., Волковицкий О. А., Гончаров Н. В., Дианов-Клоков В. И. // *ПТЭ.* 1974. № 1. С. 198–201.
20. Баранов Ю. И., Сизов Н. И. // *Тр. ИЭМ. Вып. 49 (139).* М.: Гидрометеоздат, 1989. С. 115–118.
21. Арефьев В. Н., Кистанов Е. И., Кумыков Х. К., Погадаев Б. Н., Сизов Н. И., Сижажев С. М. // *Тр. ИЭМ. Вып. 17(116).* М.: Гидрометеоздат, 1986. С. 102–111.
22. Kneizys F. X., Shettle E. P., Gallery W. O., Chetwynd J. H., Abren L. W., Selby E. A., Clough S. A., Fenn R. W. *Atmospheric Transmittance/Radiance: Compute Code LOWTRAN 6//AFGL-TR-83-0187,* Hanscom, MA. 1983.
23. Арефьев В. Н., Дианов-Клоков В. И., Радионов В. Ф., Сизов Н. И. // *Оптика и спектроскопия.* 1975. Т. XXXIX. № 5. С. 982–983.
24. Арефьев В. Н., Дианов-Клоков В. И. // *Оптика и спектроскопия.* 1977. Т. 42. № 5. С. 849–855.
25. Arefiev V. N., Dianov-Klokov V. I., Ivanov V. M., Sizov N. I. // *J. de Phys.* 1980. V. 41. № 11. P. 101–105.
26. Arefiev V. N., Dianov-Klokov V. I., Ivanov V. M., Sizov N. I. // *JQSRT.* 1981. V. 25. P. 83–92.
27. Montgomery G. P. // *Appl. Opt.* 1978. V. 17. № 15. P. 2299–2303.
28. Творогов С. Д., Фомин В. В. // *Оптика и спектроскопия.* 1971. Т. 31. Вып. 3. С. 413–421.
29. Арефьев В. Н., Сизов Н. И., Погадаев Б. Н. // *Квантовая электроника.* 1983. Т. 10. № 3. С. 496–502.
30. McClatchey R. A. et al. *AFCRL atmospheric absorption line parameters compilation.* // *AFCRL-TR-73-0096,* Environmental research papers, № 434, Air force Cambridge research laboratories, L. G. Hanscom Field, Bedford Mass 01730 1973; Rothman L. S. and McClatchey R. A. // *Appl. Opt.* V. 15. 1976. P. 2616; Rothman L. S., Clough S. A., McClatchey R. A., Young L. D. G., Snider D. E. and Goldman A. // *Appl. Opt.* 1978. V. 17. P. 507; Rothman L. S. // *Appl. Opt.* 1981. V. 20. № 5. P. 791–795; Rothman L. S., Goldman A., Gillis J. R., Tipping R. H., Brown L. R., Margolis J. S., Maki A. // *Appl. Opt.* 1981. V. 20. № 8. P. 1323–1328; Rothman L. S., Goldman A., Gillis J. R., Gamache R. R., Pickett A. H., Poyater R. L., Husson N. and Chedin. // *Appl. Opt.* 1983. V. 22. № 11. P. 1616–1626; Rothman L. S., Gamache R. R., Barbe A., Goldman A., Gillis J. R., Brown L. R., Tothi R. A., Flaud L. M. and Camy-Peyret C. // *Appl. Opt.* 1983. V. 22. № 15. P. 2247–2255; Rothman L. S., Gamache R. R., Goldman A., Brown L. R., Tothi C., Barbe A., Husson N., Rinsland C. P. and Smith M. A. N. // *Appl. Opt.* 1987. V. 26. № 19. P. 4058–4097.
31. Chedin A., Husson N., Scott N. // *Ann. Geophys.* 1986. V. 4. P. 185–190.
32. Войцеховская О. К., Макушкин Ю. С., Попов А. И., Розина А. В., Трифонова Н. Н., Яковлева Н. Е. // *Прикладное математическое обеспечение в системе коллективного пользования.* Новосибирск: Наука, 1986. С. 18–28.
33. Арефьев В. Н., Вишератин К. Н., Сизов Н. И. // *Тр. ИЭМ. Вып. 18(119).* М.: Гидрометеоздат, 1986. С. 23–26.

34. Арефьев В.Н., Баранов Ю.И., Сизов Н.И. //Тр. ИЭМ. Вып. 19(125). М.: Гидрометеоздат, 1987. С. 85–87.
35. Schnell W. and Fischer G. //Appl. Opt. 1975. V. 14. № 9. P. 2058–2059.
36. Tomasi C., Guzzi R., Vittori O. //J. Atm. Sci. 1974. V. 31. № 1. P. 255–260.
37. Tomasi C. //Pure and Appl. Geophys. 1978. V. 116. № 6. P. 1063–1076.
38. Grassl H. //Contributions to Atmospheric Physics. 1976. V. 49. № 4. P. 225–236.
39. Зуев В.Е., Самохвалов И.А., Соснин А.В., Хмельницкий Г.С. //Дистанционное зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука. 1978. С. 125–136.
40. Gane D. //DINP 3858 E. M. I. Electronic LTD. 1971.
41. Raz E., Devir A.D., Ben-Shalom A., Oppenheim U.P., Lipson S.G. //Appl. Opt. 1987. V. 26. № 12. P. 2436–2440.
42. Богданов С.С., Броунштейн А.М., Казакова К.В., Парамонова Н.Н., Фролов А.Д. //Тр. ГГО. Вып. 369. Л.: Гидрометеоздат, 1976. С. 57–71.
43. Парамонова Н.Н., Броунштейн А.М. //Тр. ГГО. Вып. 419. Л.: Гидрометеоздат, 1980. С. 110–119.
44. Парамонова Н.Н., Гуляева Т.М., Броунштейн А.М. //Тр. ГГО. Вып. 469. Л.: Гидрометеоздат, 1985. С. 105–113.
45. Lee A.C.L. //Quart. J. Met. Soc. 1973. V. 99. № 422. P. 490–505.
46. Coffey M.I. //Quart. J. Roy. Met. Soc. 1977. V. 103. № 438. P. 685–692.
47. Дианов-Клоков В.И., Иванов В.М. //Квантовая электроника. 1975. Т. 2. № 7. С. 1579–1581.
48. Арефьев В.Н., Дианов-Клоков В.И. //Тр. ИЭМ. Вып. 4(61). М.: Гидрометеоздат, 1975. С. 18–21.
49. Дианов-Клоков В.И., Иванов В.М. //Изв. АН СССР. ФАО. 1979 Т. 15. № 6. С. 679–683.
50. Арефьев В.Н., Дианов-Клоков В.И., Иванов В.М., Сизов Н.И. Континуальное поглощение излучения 8–13 мкм водяным паром. М.: 1979. 34 с. (Препринт/ИФА АН СССР).
51. Дианов-Клоков В.И., Иванов В.М., Членова Г.В. Исследование ослабления излучения в окне прозрачности атмосферы 8–13 мкм. М.: 1982. 28 с. (Препринт/ИФА АН СССР).
52. Чавро А.И. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. Т. 18. № 6. 1982. С. 632–640.
53. Парамонова Н.Н., Броунштейн А.М., Казакова К.В., Немец О.А. // Тр. ГГО. Вып. 496. Л.: Гидрометеоздат, 1985. С. 94–99.
54. Филиппов В.Л., Митрумьянц С.О. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1971. Т. 7. № 7. С. 818–824.
55. Малкевич М.С., Георгиевский Ю.С., Розенберг Г.В., Шукуров А.Х., Чавро А.И. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. Т. 9. № 12. С. 1257–1268.
56. Макаров А.С., Филиппов В.Л. //Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 3. С. 368–371.
57. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 6. С. 16–22.
58. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А., Веретенников В.В., Ужegov В.Г., Фадеев В.Я. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
59. Малкевич М.С., Георгиевский Ю.С., Чавро А.И., Шукуров А.Х. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1978. Т. 14. № 3. С. 273–284.
60. Шукуров А.Х. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т. 22. № 10. С. 1034–1041.
61. Gerber H. //Appl. Opt. 1987. V. 26. № 3. P. 539–544.
62. Volz F.E. //J. Geophys. Res. 1972. № 77. P. 1017–1031.
63. Арефьев В.Н., Дианов-Клоков В.И., Малков И.П. //Тр. ИЭМ. Вып. 8(81). М.: Гидрометеоздат, 1978. С. 73–78.
64. Арефьев В.Н., Гончаров Н.А., Кумыков Х.К., Погадаев Б.Н., Сизов Н.И., Сижажев С.М. //Тр. ИЭМ. Вып. 19(125). М.: Гидрометеоздат, 1987. С. 88–93.

Научно-производственное объединение  
«Тайфун», Москва

Поступила в редакцию  
26 июня 1989 г.

**V.N. Arefiev. Molecular Water Vapor Absorption of Radiance in 8–13  $\mu\text{m}$  Atmospheric Relative Transparency Window.**

The integrated findings of long complex laboratory and field studies on water vapor continuum and selective absorption of CO<sub>2</sub>-laser radiation are given. A refined model of the water vapor continuum is developed which makes allowance for all of the continuum regularities and is in a good agreement with the laboratory data available elsewhere and our field observations as well.