



УДК 535; 504.32  
ББК 22.3

## РОЛЬ КОНТИНУАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ПАРОВ ВОДЫ В ОКНЕ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ<sup>1</sup>

*К.М. Фирсов, Е.В. Бобров*

Проведен анализ моделей континуума, используемых в задачах переноса излучения в окне прозрачности атмосферы 8–12 мкм. Приведены результаты численного моделирования нисходящих потоков теплового излучения для условий Западной Сибири. Предложена схема возможного эксперимента для уточнения моделей континуального поглощения.

**Ключевые слова:** молекулярная спектроскопия, молекулярное поглощение, перенос излучения, континуальное поглощение, водяной пар.

Роль малых газовых составляющих в радиационных процессах в атмосфере Земли общеизвестна. Одна из наиболее популярных гипотез об изменении климата, как в прошлом, так и в настоящем, связывает изменение температуры с вариациями парниковых газов в атмосфере Земли в первую очередь с углекислым газом [1]. Возрастающие масштабы загрязнения атмосферы Земли приводят к возрастанию роли других газов, таких как метан, окислы азота и фреоны. Согласно оценкам, полученным в работах [2; 10; 11; 24], удвоение концентрации  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CF}_2\text{CL}_2$ , и  $\text{CFCL}_3$  дает эффект, аналогичный удвоению концентрации углекислого газа. Эти оценки были получены на основе уравнения радиационного баланса, определяющего равенство между потоками энергии, получаемыми Землей от Солнца и уходящими тепловыми потоками от Земли. В простейшем случае это уравнение можно представить в виде [2]:

$$(1 - A)S_0 / 4 = \varepsilon\sigma T^4, \quad (1)$$

где  $A = 0,3 \pm 0,01$  – альbedo Земли, которое определяется как отношение восходящего и нисходящего потоков излучения и характеризует долю излучения, отраженного поверхностью Земли и рассеянного атмосферой и облаками;  
 $S_0 = 1\,376 \text{ Вт/м}^2$  – солнечная постоянная (поток излучения от Солнца на верхней границе атмосферы);  
 $\varepsilon = 0,62$  – коэффициент излучения атмосферы (определяет парниковый эффект);  
 $T = 288 \text{ К}$  – средняя температура Земли;  
 $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$  – постоянная Стефана – Больцмана.

Из приведенной выше формулы следует, что при изменении солнечной постоянной, либо альбедо Земли, либо коэффициента излучения произойдет изменение температуры поверхности Земли. Расчеты показывают, что возрастание концентрации углекислого газа вдвое приводит к изменению восходящих потоков излучения примерно на  $3 \text{ Вт/м}^2$  и к возрастанию средней температуры Земли примерно на  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Однако более точные оценки чувствительности климата к возрастанию концентрации парниковых газов, полученные на основе моделей общей циркуляции, составляют величину  $2,0\text{--}4,5 \text{ }^\circ\text{C}$  [4]. Неопределенность этих оценок обусловлена проблемами учета обратных связей. Так, например, без учета обратных связей удвоение концентрации  $\text{CO}_2$  приведет к возрастанию температуры Земли примерно на  $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , а с учетом положительной обратной связи (при возрастании температуры увеличивается концентрация паров воды) прирост температуры удвоится.

Водяной пар является основным поглощающим газом в атмосфере Земли, но зачастую его не относят к парниковым газам, так как возрастание его концентрации происходит опосредованно, через обратные связи. Причем, наряду с положительными обратными связями, имеются и отрицательные обратные связи, которые уменьшают эффект нагрева земной поверхности. Наибольшую сложность в настоящее время вызывает описание облачно-радиационных связей, тогда как обратные связи между потеплением климата и содержанием паров воды и изменениями вертикального градиента атмосферы описываются неплохо.

Несмотря на вышесказанное, современные модели переноса радиации в безоблачной атмосфере еще далеки от совершенства, в первую очередь это касается поглощения парами воды. Так, например, согласно оценкам, приведенным в нашей работе [5], погрешности в нисходящих потоках теплового излучения, обусловленные неопределенностями в коэффициентах континуального поглощения, составляют величину  $\sim 2\text{--}3 \text{ Вт/м}^2$ , которая сопоставима с эффектом удвоения  $\text{CO}_2$  в атмосфере Земли.

В настоящее время сложилась парадоксальная ситуация, когда модели, полученные на основе данных натуральных наблюдений, противоречат данным лабораторных измерений. Во-первых, разброс экспериментально измеренных коэффициентов континуального поглощения составляет  $10\text{--}20 \%$ , что может приводить к большим погрешностям в потоках длинноволновой радиации [2]. Во-вторых, согласно [13] модель континуального поглощения MTCD2.4 достаточно неплохо описывает данные натуральных измерений. С другой стороны, наши оценки показывают, что уточнение этой модели на основе современных высокоточных лабораторных экспериментов [6] приведет к тому, что данные натуральных измерений будут описываться хуже.

Целью работы является сопоставление моделей континуума, используемых в задачах переноса излучения в окне прозрачности атмосферы  $8\text{--}12 \text{ мкм}$ , а также разработка методики возможного эксперимента в натуральных условиях для уточнения этих моделей.

Окно прозрачности атмосферы  $8\text{--}12 \text{ мкм}$  играет важную роль в радиационном балансе атмосферы. Поглощение атмосферными газами в этом спектральном диапазоне определяется не только тонкой структурой спектров поглощения, но и континуальным поглощением паров воды. В настоящее время существует два подхода к определению континуального поглощения, которые основываются на мономерной [3; 20] и кластерной гипотезах [19; 23], хотя в последнее время преобладает точка зрения о том, что наряду с поглощением мономерами следует учитывать и поглощение димерами, например [16]. Достаточно продолжительное время отрицательная температурная зависимость для окна  $8\text{--}12 \text{ мкм}$  являлась важным аргументом в пользу димерной гипотезы, однако такую же зависимость дает и мономерная гипотеза, причем оценки температурной зависимости совпадают не только качественно, но и количественно. Особенностью континуального поглощения является то, что оно достаточно мало и для его экспериментального исследования необходимы самые чувствительные методы исследования. Наиболее детальные лабораторные исследования проведены для комнатных температур, тогда как в стратосфере такие температуры реализуются лишь для летних условий и для приземных высот. Измерения при низких температурах затруднены вследствие того, что концентрация паров воды экспоненциально падает с понижением температуры.

Для моделирования потоков радиации широко используются эмпирические модели, которые получили название RSB [18], СКД [8], позднее МТСКД по фамилиям авторов, принимавших участие в их создании. Следует отметить, что модель RSB определена только для окна 8–12 мкм. В настоящее время наиболее широко используется модель МТСКД, согласно которой континуум принято определять как разность экспериментально измеренного коэффициента поглощения и расчетного с использованием фойгтовского контура, причем каждая спектральная линия учитывается лишь в интервале  $\pm 25 \text{ см}^{-1}$ . Таким образом, континуум определяется как сумма вкладов в коэффициент поглощения от далеких спектральных линий, отстоящих от заданного волнового числа на расстояние большее  $25 \text{ см}^{-1}$  и как сумма вкладов от ближних линий, обусловленных разностью между реальным коэффициентом поглощения и расчетным с использованием лоренцевского контура. Модель МТСКД – эмпирическая модель, параметры которой определяются путем подгонки к экспериментальным данным. Ее широкое использование обусловлено тем, что она верифицирована к атмосферным измерениям нисходящих потоков излучения в контролируемых условиях [13; 22].

Коэффициент континуального поглощения представляют в виде:

$$k = k_s + k_f = (C_s \exp(-T_s / T) n_{\text{H}_2\text{O}} + C_f n) p_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (2)$$

где  $n$  – число молекул воздуха в единице объема;  
 $n_{\text{H}_2\text{O}}$  – число молекул  $\text{H}_2\text{O}$  в единице объема;  
 $p_{\text{H}_2\text{O}}$  – парциальное давление паров воды;  
 $T_s$  – параметр, определяющий температурную зависимость коэффициента континуального поглощения в случае самоуширения;  
 $C_s, C_f, T_s$  – параметры, определяемые из эксперимента.

В настоящее время результаты ряда лабораторных измерений [6; 14; 16] демонстрируют, что современные модели континуального поглощения в микроокнах полос поглощения занижают коэффициенты континуального поглощения, обусловленные уширением воздуха (foreign continuum,  $C_f$ ), а в окне прозрачности атмосферы 8–12 мкм завышают обратную температурную зависимость коэффициентов континуального поглощения, обусловленных самоуширением (self continuum,  $C_s$ ). В частности, в работах [6; 12] отмечалось, что в модели МТСКД используется слишком сильная температурная зависимость, которая при повышенных температурах приводит к расхождениям, достигающим 50 %.

На основе экспериментальных данных [6] нами были оценены параметры  $C_s$  при температуре  $T = 296 \text{ K}$  и  $T_s$  (см. рис. 1).

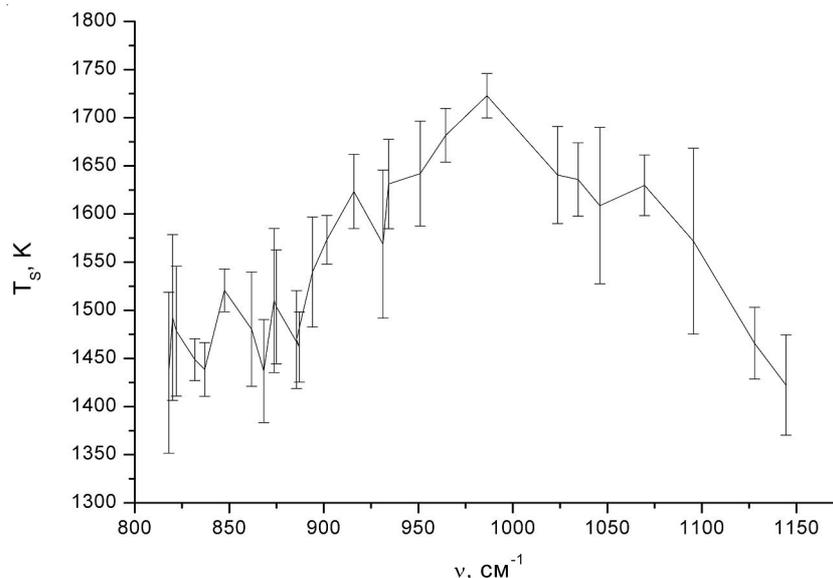


Рис. 1. Спектральная зависимость параметра  $T_s$

Из рисунка 1 видно, что параметр  $T_s$  меняется в диапазоне 1 500–1 700 К и имеет ярко выраженную спектральную зависимость. Следует отметить, что практически для всех современных моделей этот параметр больше 1 800 К.

О коэффициенте  $C_f$ , входящем в формулу (2), имеются противоречивые данные. Как следует из таблицы 1, данные лабораторных измерений [7] коэффициентов  $\gamma = C_f/C_s$  значительно отличаются от модельных. Причем, в современных моделях МТСКД этот коэффициент был уменьшен в сравнении с первоначальными морях [13].

Таблица 1

Отношение коэффициентов  $C_f/C_s$  на частоте 950 см<sup>-1</sup>

	Burch [7]	RSB [18]	CKD1 [8]	МТСКД1.0
$\gamma = C_f/C_s$	0,005	0,001	0,0014	0,00038

Поскольку параметр  $C_f$  определяется с большой неопределенностью, то из экспериментальных данных его температурную зависимость определить не представляется возможным. Поэтому для этих целей мы использовали приближение лоренцевских крыльев линий. В этом случае коэффициент поглощения, обусловленный уширением воздуха, описывается формулой:

$$k_f = C_f \exp\left(-hc/k E_0 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) Q_{VR}(T) \left(\frac{T_0}{T}\right)^{3/2} n P_{H_2O}, \quad (3)$$

где  $Q_{VR}(T)$  – колебательно-вращательная статистическая сумма, которую для нелинейных молекул можно аппроксимировать с хорошей точностью простой зависимостью  $\sim(T/T_0)^{3/2}$ .

Поскольку вклад в окно прозрачности дают две соседние полосы паров воды: 6,3 мкм колебательно-вращательная полоса и вращательная полоса, то для каждой полосы мы оценили средние значения энергии нижнего состояния  $E_0$ , которые имели значения 315,04 см<sup>-1</sup> и 433,35 см<sup>-1</sup> соответственно. Для того чтобы температурная зависимость коэффициента поглощения  $k_f$  была подобной  $k_s$ , мы получили аппроксимацию в виде:

$$k_f = C_f e^{-T_f \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} n P_{H_2O}, \quad (4)$$

где  $T_f = 1 100$  К.

Наши оценки показали, что температурная зависимость для коэффициента  $k_f$  отрицательная, как и для  $k_s$ . На рисунке 2 приведены температурные зависимости коэффициентов  $k_s$  и  $k_f$ .

В условиях атмосферы Земли меняются все термодинамические параметры, от которых зависит коэффициент континуального поглощения: температура, давление воздуха и влажность. Для того чтобы проанализировать поведение коэффициента континуального поглощения при различных температурах, расчет проводился при фиксированных значениях давления (1 атм) и относительной влажности (50 %).

На рисунке 3 приведен расчет коэффициента континуального поглощения по нашей модели согласно данным [6] без учета уширения воздухом (кривая B).

Для того чтобы учесть уширение воздухом, мы ввели коэффициент  $\gamma = C_f/C_s$ , равный 0,003 при температуре 296 К, который был выбран таким образом, чтобы при низких температурах коэффициент континуального поглощения совпадал с моделью RSB (кривая B1), а при повышенных температурах совпадал в пределах погрешности с данными эксперимента [6]. Результаты моделирования показали, что значение коэффициента  $\gamma = 0,0011$  обеспечивало совпадение расчетов по нашей модели с моделью МТСКД в температурном диапазоне 250–290 К. Аналогичная картина наблюдалась и для других частот. Таким образом, две модели с различными параметрами хорошо описывают температурную зависимость коэффициента поглощения для условий, реализующихся в атмосфере Земли. Это, по нашему мнению, и объясняет противоречие между данными натурных и лабораторных измерений.

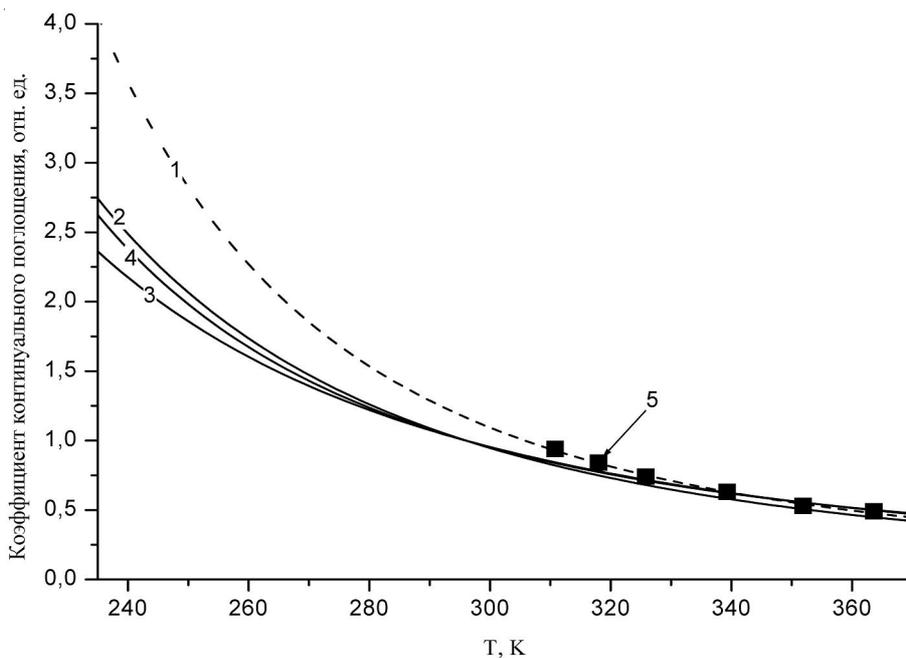


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициентов континуального поглощения на длине волны  $144,5 \text{ см}^{-1}$ :  
 1 –  $k_s$ ; 2 –  $k_f$  для вращательной полосы воды; 3 –  $k_f$  для 6,3 мкм полосы воды;  
 4 – усредненная температурная зависимость  $k_f$ ; 5 – экспериментальные данные [6]

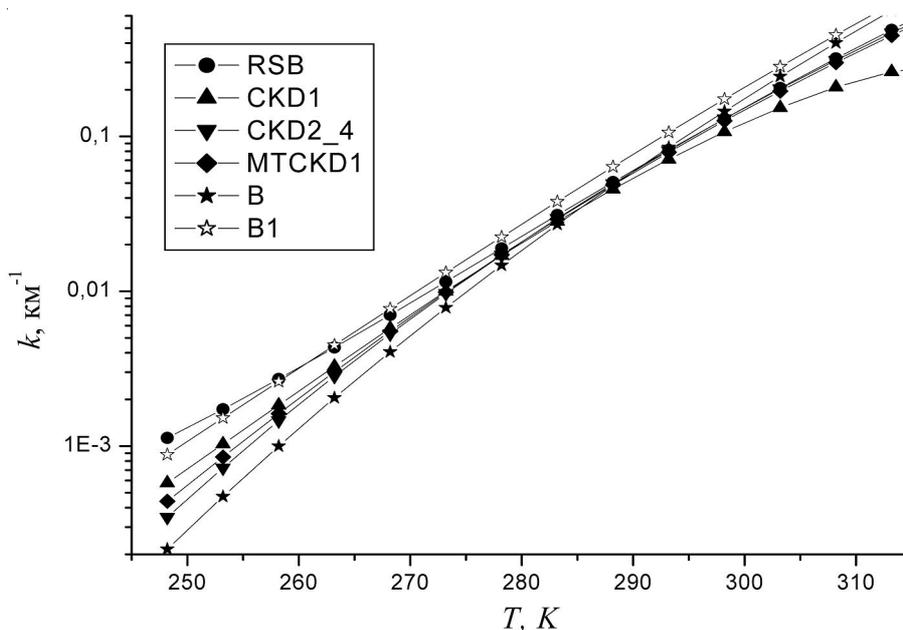


Рис. 3. Зависимость коэффициента континуального поглощения паров воды для частоты  $950 \text{ см}^{-1}$  от температуры при относительной влажности 50 %. B, B1 – расчет на основе данных работы [6] без учета и с учетом уширения воздухом

Из рисунка 3 видно, что вклад «foreign» континуума наиболее существенен при низкой температуре. Однако при температуре ниже  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  величина коэффициента континуального поглощения менее  $0,1 \text{ км}^{-1}$ . Это означает, что в лабораторных условиях для уверенной регистрации необходимы трассы длиной 5–10 км и более, что на сегодняшний день проблематично реализовать. Следовательно, необходим атмосферный эксперимент в строго контролируемых атмосферных условиях. Периодически такие эксперименты проводятся (см., например: [9; 15; 17; 21]). Следу-

ет заметить, что эти эксперименты в основном проводятся в полосах поглощения, а не в окне прозрачности вследствие малости коэффициентов поглощения.

Тем не менее мы провели численный эксперимент по расчету нисходящих потоков излучения с умеренным спектральным разрешением ( $20 \text{ см}^{-1}$ ) для зимних условий Западной Сибири. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.

Из рисунка 4 видно, что регрессионные зависимости для двух моделей заметно различаются ( $\sim 20\%$ ). Основная причина этого расхождения обусловлена различиями в значениях параметра  $\gamma$  (см. табл. 1).

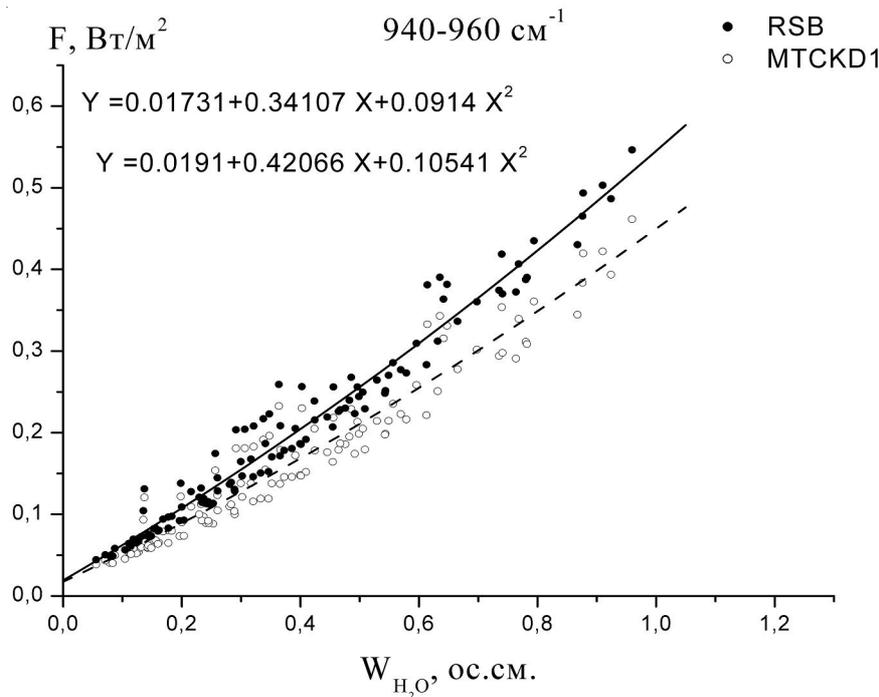


Рис. 4. Регрессионная зависимость нисходящего потока излучения на уровне Земли от общего влагосодержания в вертикальном столбе атмосферы

Следовательно, можно ставить вопрос о проведении атмосферного эксперимента по упрощенной схеме: одновременно с измерениями нисходящих потоков излучения определять общее содержание паров воды в вертикальном столбе атмосферы. А если помимо этого учесть вертикальные профили температуры, то из анализа полученной статистической информации можно будет уточнить коэффициенты континуального поглощения, обусловленные уширением воздуха  $k_j$  и уменьшить существующие неопределенности.

#### ПРИМЕЧАНИЕ

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке государственного контракта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» № 02.740.11.5.198 и гранта РФФИ № 11-05-97044-р-Поволжье.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будыко, М. И. История атмосферы / М. И. Будыко, А. Б. Ронов, А. Л. Яншин. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 207 с.
2. Мицель, А. А. Перенос оптического излучения в молекулярной атмосфере / А. А. Мицель, К. М. Фирсов, Б. А. Фомин. – Томск : Изд-во РАН, 2001. – 444 с.

3. Несмелова, Л. И. Контур спектральной линии и межмолекулярное взаимодействие / Л. И. Несмелова, О. Б. Родимова, С. Д. Творогов. – Новосибирск : Наука, 1986. – 213 с.
4. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М., 2008. – 228 с.
5. Фирсов, К. М. Чувствительность нисходящих длинноволновых потоков радиации к континуальному поглощению паров воды / К. М. Фирсов, Т. Ю. Чеснокова // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23, № 08. – С. 650–655.
6. Baranov, Yu. I. Water-vapor continuum absorption in the 800–1250  $\text{cm}^{-1}$  spectral region at temperatures from 311 to 363 K / Yu. I. Baranov, W. J. Lafferty, Q. Ma, R. H. Tipping // JQSRT. – 2008. – V. 109. – P. 2291–2302.
7. Burch, D. E. Continuum absorption by  $\text{H}_2\text{O}$  in the 700–1200  $\text{cm}^{-1}$  and 2400–2800  $\text{cm}^{-1}$  windows / D. E. Burch // Technical report AFGL-TR-84-0128. Air Force Geophysical Laboratory. – 1984. – 32 p.
8. Clough, S. A. Line shape and the water vapor continuum / S. A. Clough, F. X. Kneizys, R. W. Davies // Atmos. Res. – 1989. – № 23. – P. 229–241.
9. Downwelling spectral radiance observations at the SHEBA ice station: Water vapor continuum measurements from 17 to 26 mm / D. C. Tobin, F. A. Best, P. D. Brown [et al.] // J. Geophys. Res. – 1999. – V. 104. – Issue D2. – P. 2081–2092.
10. Ellingson, R. G. The intercomparison of radiation codes uses in climate models: long wave result / R. G. Ellingson, J. Ellis, S. Fels // Journ. Geoph. Research. – 1991. – V. 96, № D5. – P. 8929–8953.
11. Greenhouse effect of trace gases / A. Lacis, J. Hansen, P. Lee, T. Mitchell, S. Lebedeff // Geoph. Research Letter. – 1981. – V. 8, № 10. – P. 1035–1038.
12. Ma, Q. Temperature dependences of mechanisms responsible for the water-vapor continuum absorption. I. Far wings of allowed lines / Q. Ma, R. H. Tipping, C. Leforestier // Journal of Chemical Physics. – 2008. – V. 128. – P. 124313–124330.
13. Mlawer, E. J. Recent Developments in the Water Vapor Continuum / E. J. Mlawer, S. A. Clough, P. D. Brown, D. S. Tobin // Proceedings of the ninth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting. – San Antonio, Texas, 1999. – P. 503–511.
14. Paynter, D. J. Laboratory measurements of the water vapor continuum in the 1200–8000  $\text{cm}^{-1}$  region between 293 K and 351 K / D. J. Paynter, I. V. Ptashnik, K. P. Shine, K. M. Smith, R. McPheat, R. G. Williams // J. Geophys. Res. – 2009. – V. 114. – D21301. doi:10.1029/2008JD011355. – P. 1–23.
15. Penny, M. R. Warren Measurements of the foreign-broadened continuum of water vapor in the 6,3  $\mu\text{m}$  band at -30 C / M. Rowe Penny, P. Walden Von, G. Stephen // Applied Optics. – 2006. – V. 45, № 18. – P. 4366–4382.
16. Ptashnik, I. V. Evidence for the contribution of water dimers to the near-IR water vapour self-continuum / I. V. Ptashnik // JQSRT. – 2008. – V. 109. – P. 831–852.
17. Retrieval of foreign-broadened water vapor continuum coefficients from emitted spectral radiance in the  $\text{H}_2\text{O}$  rotational band from 240 to 590  $\text{cm}^{-1}$  / C. Serio, G. Masiello, F. Esposito [et al.] // Optics Express. – 2008. – V. 16, № 20. – P. 15817–1832.
18. Roberts, R. E. Infrared continuum absorption by atmospheric water vapor in the 8–12 micron meter window / R. E. Roberts, J. E. A. Selby, L. M. Biberman // Appl. Opt. – 1976. – № 15. – P. 2085–2090.
19. Scribano, Y. Contribution of water dimer absorption to the millimeter and far infrared atmospheric water continuum / Y. Scribano and C. Leforestier // J. Chem. Phys. – 2007. – V. 126, № 23. – P. 234301 (12 pages).
20. Tipping, R. H. Theory of the water vapor continuum and validations / R. H. Tipping, Q. Ma // Atmos. Res. – 1995. – V. 36. – P. 69–94.
21. Tobin, D. C. Experimental investigation of the self- and  $\text{N}_2$ -broadened continuum within the  $\nu_2$  band of water vapor / D. C. Tobin, L. L. Strow, W. J. Lafferty, W. B. Olson // Applied Optics. – 1996. – V. 35. – P. 4724–4734.
22. Tjemkes, S. A. The ISSWG line-by-line inter-comparison experiment / Tjemkes S. A., Patterson T. [et al.] // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. – 2003. – V. 77. – P. 433–453.
23. Vigasin, A. A. Water vapor continuum absorption in various mixtures: possible role of weakly bound complexes / A. A. Vigasin // JQSRT. – 2000. – V. 64. – P. 25–40.
24. Wang, W. C. Intercomparison of the thermal Radiative effect of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ , and  $\text{CFCl}_3$  into the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model / W. C. Wang, G. Y. Shi, J. T. Kiehl // Journ. Geoph. Research. – 1991. – V. 96, № D5. – P. 9097–9103.

**ROLE OF CONTINUUM ABSORPTION OF WATER VAPOR  
IN WINDOW TRANSPARENCY OF THE EARTH ATMOSPHERE**

*K.M. Firsov, E.V. Bobrov*

The analysis of the continuum models used in radiative transfer problems in the atmospheric window 8–12 microns was performed. The results of numerical simulation of downwelling heat radiation for Western Siberia conditions are presented. Scheme for a possible experiment to refine models of continuum absorption is proposed.

**Key words:** *molecular spectroscopy, molecular absorption, radiative transfer, the continuum absorption, water vapor.*