

СПЕКТРОСКОПИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.521.32

Континуальное поглощение водяного пара в окнах прозрачности ближнего ИК-диапазона

И.В. Пташник, Т.М. Петрова, Ю.Н. Пономарев, А.А. Солодов, А.М. Солодов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 2.06.2014 г.

Проведены измерения поглощения инфракрасного излучения водяным паром в спектральном диапазоне 2000–8000 см⁻¹. Регистрация спектров производилась с помощью IFS 125 HR Фурье-спектрометра при температуре 287 К и спектральном разрешении 0,03 см⁻¹. Восстановлен спектр континуального поглощения водяного пара с привязкой к известному поглощению в окне 2500 см⁻¹. Показано, что в рассмотренных условиях, в четырех исследованных окнах прозрачности величина континуума различается не более чем на 20%. Это находится в противоречии с моделью континуума MT_CKD, которая предсказывает гораздо большую изменчивость континуума в этих окнах прозрачности.

Ключевые слова: континуум H₂O, MT_CKD континуум, окна прозрачности, Фурье-спектроскопия; H₂O continuum, MT_CKD continuum, atmospheric windows, FTS spectroscopy.

Введение

Водяной пар является одним из наиболее важных газов в радиационном балансе атмосферы Земли, играя роль положительной обратной связи в изменении климата [1]. Инфракрасный спектр водяного пара включает как сильные полосы поглощения, состоящие из большого количества отдельных спектральных линий, так и расположенные между ними «окна прозрачности» с гораздо более слабым поглощением. Поглощение излучения в этих окнах обусловлено, главным образом, не спектральными линиями, а так называемым «континуумом» водяного пара – слабозависящей от частоты составляющей поглощения, присутствующей как в полосах поглощения, так и в окнах прозрачности и оказывающей большое влияние на радиационный баланс атмосферы и на дистанционное зондирование [2–4].

Природа континуального поглощения излучения водяным паром является предметом продолжительных дискуссий. Основными являются три гипотезы: кумулятивный вклад дальних крыльев линий молекул воды [5, 6], поглощение стабильными и метастабильными димерами воды (т.е. парами слабосвязанных молекул воды) [7–11] и «столкновительно-индуцированное» поглощение, понимаемое как переходы, индуцированные кратковременно наведенным/измененным дипольным моментом в момент столкновения [12]. Выделяют два компонента

континуального поглощения: «self-continuum», обусловленный только молекулами воды, и «foreign continuum», обусловленный взаимодействием молекул воды с молекулами других газов – в земной атмосфере, главным образом с азотом. (К сожалению, не существует краткого русскоязычного аналога данных терминов. Используемый ранее термин «континуум самоуширения» является физически некорректным, так как подразумевает только природу континуума, обусловленную крыльями линий, что, как было показано в последние годы, является ошибочным, по крайней мере в отдельных спектральных интервалах.) В настоящей статье мы исследуем self-continuum, который дает определяющий вклад в поглощение излучения в окнах прозрачности атмосферы.

Большинство программ для расчета распространения радиации в атмосфере используют сегодня полуэмпирическую модель континуума MT_CKD [13], которая вполне адекватно описывает континуальное поглощение во многих спектральных интервалах. Однако она основана на подгонке к ограниченному числу экспериментальных данных (в основном, в дальней ИК-области спектра) и является экстраполяцией почти во всем ближнем ИК и видимом диапазонах. Более того, как показали недавние измерения [14], даже в области спектра, где модель подгонялась к эксперименту, она значительно (до 50%) отклоняется от новых данных, полученных при других температурах. Таким образом, предсказательная способность этой модели в некоторых спектральных интервалах оставляет желать лучшего. Физическая трактовка континуума, постулируемая в рамках модели CKD/MT_CKD

* Игорь Васильевич Пташник (riv@iao.ru); Татьяна Михайловна Петрова (tanja@iao.ru); Юрий Николаевич Пономарев (yurion@iao.ru); Александр Александрович Солодов (solodov@sibmail.com); Александр Михайлович Солодов (solodov@asd.iao.ru).

ее авторами, также претерпевала значительные изменения на протяжении двух десятков лет [13] и активно дискутировалась [8–11, 15].

За последние годы была выполнена обширная серия экспериментов по восстановлению континуального поглощения водяного пара в широком спектральном диапазоне при разных давлениях и температурах. Эти исследования, в том числе выполненные в рамках консорциума CAVIAR (<http://www.met.reading.ac.uk/caviar>), выявили весьма сложную природу континуума с явными свидетельствами в пользу доминирующего вклада димеров воды в полосах поглощения [8, 10, 11]. Неожиданным фактом оказалось также, что в некоторых окнах прозрачности поглощение как self-continuum [16, 17], так и foreign-continuum [18, 19] до порядка величины сильнее, чем в модели MT_CKD [13].

Большая часть этих измерений, однако, была выполнена при повышенных давлениях/температурах (для того чтобы зарегистрировать слабое континуальное поглощение), что затрудняет использование полученных данных для атмосферы Земли. Кроме того, экспериментально определенные величины поглощения в окнах прозрачности 4700 и 6300 см^{-1} (2,1 и 1,6 мкм) при комнатных температурах весьма противоречивы. В работах [16] и [20], где использовались метод Фурье-спектроскопии и большие кюветы, данные согласуются между собой. Однако результаты, полученные в работах [21] и [22], соответственно методами калориметрической интерферометрии и внутриврезонаторного затухания, свидетельствуют о значительно меньших величинах self-continuum, различаясь также между собой в 4–5 раз.

Нами были проведены измерения, аналогичные выполненным ранее в [20]. При этом для более уверенной регистрации слабого континуального поглощения в окнах прозрачности установка была усовершенствована, в частности в 1,75 раза увеличена оптическая длина пути в многоходовой кювете.

Эксперимент

Эксперимент проводился с использованием Фурье-спектрометра высокого разрешения Bruker IFS-125 FTS и 30-метровой (по базе) многоходовой кюветы системы White в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (<http://www.iao.ru/ru/resources/equip/cells>). Схема Фурье-спектрометра и описание элементов установки, включая многоходовую кювету, приводились ранее в [20, 23]. Для более надежной регистрации слабого континуального поглощения водяного пара в окнах прозрачности в данном эксперименте длина оптического пути в кювете была увеличена с 612 [20] до 1065,5 м благодаря установке новых зеркал с серебряным напылением. Эти зеркала обладали теми же самыми фокусными расстояниями, что и предыдущие, поэтому оптическая система согласования Фурье-спектрометра с кюветой осталась без изменений [20, 23]. Новые зеркала отличались более крупными геометрическими размерами: диаметр двух задних

зеркал объективов равнялся 30 см, входное переднее зеркало имело размер 50×30 см (т.е. в 1,67 раза длиннее предыдущего [23]). Коэффициент отражения зеркал с серебряным покрытием в ближнем ИК-диапазоне превышал 0,98 (для сравнения: коэффициент отражения ранее используемых зеркал с алюминиевым напылением составлял приблизительно 0,87).

Перед началом измерений кювета была откачана до давления 0,02 мбар, спектр пропускания откачанной кюветы был использован в качестве базовой линии. Измерения проведены при температуре 287 К и давлении водяного пара 12,4 мбар в диапазоне 1800–10000 см^{-1} со спектральным разрешением 0,03 см^{-1} . В качестве источника излучения использовалась галогеновая лампа Osram мощностью 50 Вт. Сигнал после прохождения через кювету регистрировался приемником излучения на основе InSb, охлаждаемым жидким азотом. Давление в кювете определялось с помощью датчика MKS Baratron, обладающего погрешностью измерения 0,25%. При измерениях с водяным паром, однако, важно исключить систематическую погрешность, которая может быть обусловлена, например, адсорбцией и десорбцией водяного пара на стенках кюветы во время эксперимента, а также неравномерным распределением пара по объему 30-метровой кюветы. Поэтому полученное с помощью датчика давление верифицировалось затем сравнением величин интенсивностей наиболее хорошо изученных спектральных линий в базе данных HITRAN-2012 [24] с измеренными интенсивностями, что позволило гарантировать точность определения концентрации водяного пара не хуже ~3% (рис. 1).

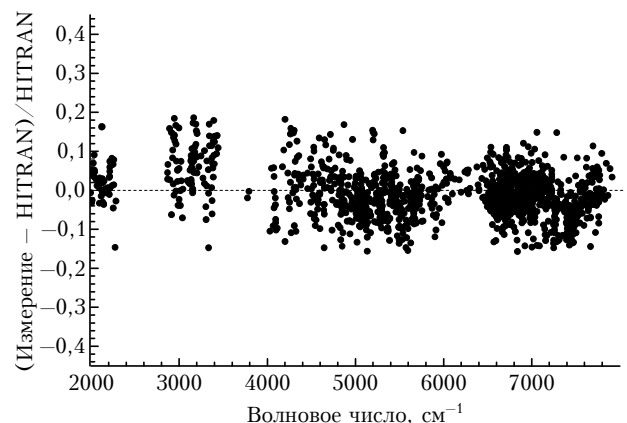


Рис. 1. Относительные отклонения экспериментально определенных интенсивностей линий водяного пара от соответствующих величин в HITRAN-2012 [24]. Рассматривались только относительно сильные линии с индексом погрешности в HITRAN не менее 5

Обработка экспериментальных спектров. Базовая линия

Оптическая толща τ_m определялась из измеренных спектров поглощения стандартным образом:

$$\tau_m(\nu) = -\ln \{I(\nu)/I_0(\nu)\}, \quad (1)$$

где I — измеренная интенсивность излучения, прошедшего кювету с водяным паром, I_0 — то же самое для пустой кюветы; ν — волновое число, см^{-1} . Оптическая толщина континуального поглощения τ_c определялась в микроокнах прозрачности (т.е. между линиями поглощения) с использованием подхода, аналогичного используемому в модели MT_CKD [13] (см. также [16]):

$$\tau_c(\nu) = \tau_m(\nu) - \Sigma\tau_{\text{line},i}(\nu - \nu_i), \quad (2)$$

где $\Sigma\tau_{\text{line},i}(\nu - \nu_i)$ — локальный лоренцевский вклад линий H_2O с центрами на ν_i , рассчитываемый в пределах 25 см^{-1} от их центров и не включающий «подкладку» (постоянную величину поглощения, которую лоренцевский контур имеет на расстоянии 25 см^{-1} от центра линии). На рис. 2 показан пример такого восстановления в узком спектральном интервале.

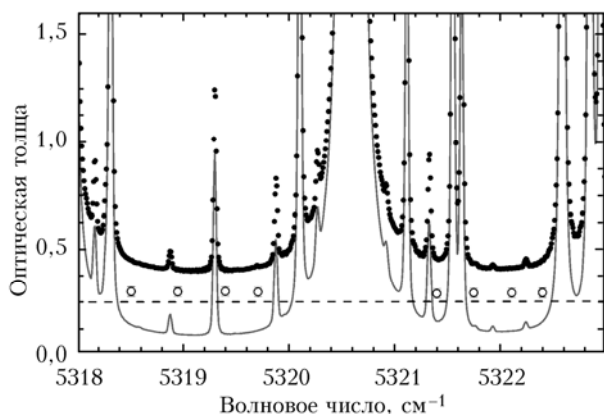


Рис. 2. Пример измеренного поглощения (точки) в чистом водяном паре и расчетного вклада линий (серая кривая) без учета континуума (давление 12,4 мбар, длина трассы 1065,5 м, температура 287 К). Восстановленный в микроокнах континуум (кружки) показан в сравнении с моделью MT_CKD-2.5 [13] (пунктир)

Локальный вклад линий рассчитывался с использованием *line-by-line* программы [25] и компиляции параметров спектральных линий водяного пара UCL (University College London, UK) [26]. Эта компиляция включает как относительно сильные линии из базы данных HITRAN [24], так и более миллиона слабых линий H_2O , полученных на основе теоретических расчетов. Как было показано, например в [16], неучет слабых линий водяного пара может приводить к заметному (на десятки процентов) завышению восстанавливаемого континуума в окнах прозрачности 1,6 и 1,25 мкм при температурах выше 400 К. Для комнатной температуры, рассматриваемой в настоящей статье, влияние слабых линий существенно слабее ввиду сильной положительной температурной зависимости их интенсивностей

Далее, сечение континуального поглощения ($\text{см}^2 \cdot \text{молек}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$) определялось стандартным образом:

$$C_s(\nu, T) = \frac{\tau_c(\nu)}{\rho_s P_s L} \equiv \tau_c(\nu) \frac{kT}{P_s^2 L}, \quad (3)$$

где ρ_s и P_s — соответственно концентрация молекул воды и давление водяного пара; k — постоянная Больцмана; T — температура; L — длина оптического пути. Определенное таким образом сечение поглощения выражено в см^2 на поглощающую молекулу и на одну атмосферу полного давления при температуре T . Следует иметь в виду, что для преобразования этих единиц в единицы, принятые в модели MT_CKD [13] ($\text{см}^2 \cdot \text{молек}^{-1} \equiv \text{см}^{-1}(\text{молек}/\text{см}^3)^{-1}$, где концентрация молекул нормирована к стандартным условиям, т.е. к давлению 1 атм при температуре 296 К), $C_s(\nu, T)$ должна быть умножена на $T/296$.

Точный учет локального вклада спектральных линий важен для восстановления континуума водяного пара в полосах поглощения, где расположено много сильных линий. В окнах прозрачности, которые представляют основной интерес для данных исследований, на первое место выходит точность определения «базовой» линии (т.е. уровня «нулевого» поглощения/ослабления) в конкретных измерениях. И хотя учет «нулевого» ослабления (т.е. любого ослабления излучения, не связанного с поглощением в водяном паре) должен учитываться в (1) делением на интенсивность излучения, прошедшего через пустую кювету, на практике это не всегда «работает». В силу ряда причин базовая линия во время измерения в кювете с исследуемым газом может отличаться от таковой, полученной из измерений с пустой кюветой. Это может быть обусловлено изменением интенсивности источника излучения, изменением хода луча в многоходовой кювете и некоторыми другими причинами.

Для решения данной проблемы необходимо иметь «опорную» точку в спектре, где бы можно было привязать поглощение к известной величине. Этой опорной точкой может быть участок спектра, где поглощение близко к нулю. В этом случае сигнал, получаемый при прохождении излучением кюветы с исследуемым газом, «масштабируется» (т.е. умножается на постоянную величину, обычно близкую к 1) для его «совмещения» с сигналом от пустой кюветы в данном участке спектра. Например, в работах [16, 19, 20] для такой «привязки» использовалась область окна прозрачности 9600 см^{-1} , где ожидаемое поглощение водяным паром (определяемое в окне прозрачности континуумом) должно было быть меньше чувствительности экспериментальной установки.

В ряде работ последних лет, однако, появились факты, указывающие на то, что реальный континуум может значительно превышать предсказания модели MT_CKD во всех окнах прозрачности ближнего ИК-диапазона [12, 16–20]. При этом можно предположить, что и в окне 9600 см^{-1} поглощение может оказаться сравнимым с порогом чувствительности для спектрометров с многоходовыми кюветами длиной пути около 1000 м. Поэтому в каче-

стве опорной точки в текущей работе было решено использовать окно 2500 см^{-1} , в котором, в отличие от других окон исследуемого диапазона, непрерывное поглощение известно сегодня со значительной степенью достоверности. Нижней границей можно считать предсказание модели MT_SKD-2.5 [13], основанное на спутниковых измерениях и составляющее для self-continuum $2,4 \cdot 10^{-23} \text{ см}^2 \cdot \text{молек}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ при 287 К, тогда как верхние оценки, полученные в лабораторных измерениях [16] и [20] при близких температурах, составили соответственно $3,6 \cdot 10^{-23}$ (293 К) [16] и $3,4 \cdot 10^{-23} \text{ см}^2 \cdot \text{молек}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ (289 К) [20]. Погрешность этих измерений довольно высокая (до $2,5 \cdot 10^{-23}$). Измерения [17], выполненные с меньшей погрешностью, но при более высоких температурах, дали значения $(2,2 \pm 1) \cdot 10^{-23}$ (311 К), $(1,3 \pm 0,6) \cdot 10^{-23}$ (318 К) и $(0,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-23}$ (325,5 К) $\text{см}^2 \cdot \text{молек}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$. Экстраполяция этих результатов на температуру $\sim 290 \text{ К}$ дает значение не менее $4,5 \cdot 10^{-24}$ [17]. Наконец, анализ самолетных измерений яркостной температуры нисходящего излучения, проведенный в работе [27, рис. 10], показал, что величина self-continuum в этой области спектра должна быть примерно между значением, полученным в [16] и предсказанием модели MT_SKD-2.5 [13].

Нами было решено выбрать в качестве опорного значения непрерывного поглощения в области 2500 см^{-1} величину из модели MT_SKD-2.5, т.е. нижнюю оценку континуума. Соответственно $I_0(\nu)$ в (1) было умножено на постоянный множитель, чтобы оптическая толщина континуума в области 2500 см^{-1} составила 0,01, что при длине пути в эксперименте 1065 м и давлении водяного пара 12,4 мбар соответствует сечению поглощения self-continuum в модели MT_SKD-2.5 (рис. 3).

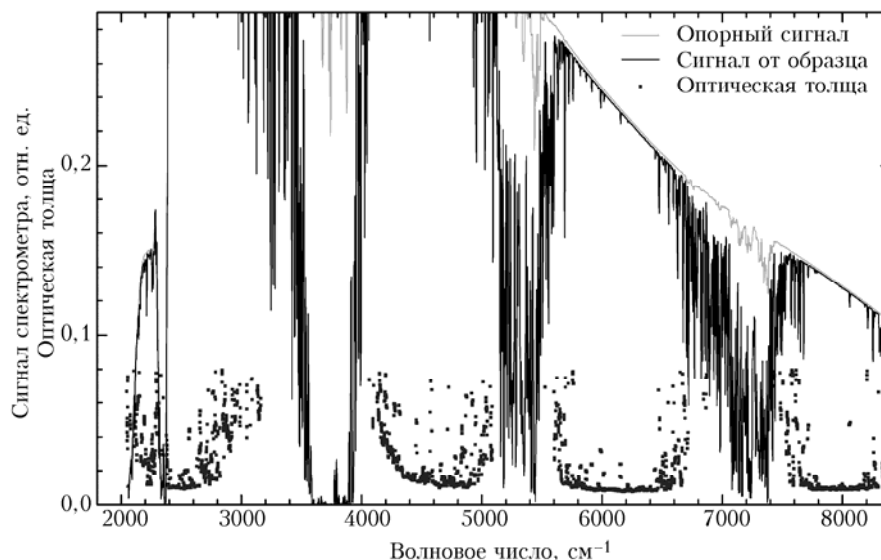


Рис. 3. Пример «опорного» сигнала спектрометра (т.е. с пустой кюветы), сигнала с кюветы, заполненной водяным паром, и восстановленной оптической толщины. Опорный сигнал откалиброван с помощью постоянного множителя во всем спектральном диапазоне, чтобы оптическая толщина континуума в области 2500 см^{-1} составила 0,01. Давление водяного пара 12,4 мбар, температура 287 К, длина трассы 1065 м

Результаты

Восстановленное сечение поглощения self-continuum показано на рис. 4 в сравнении с результатами предыдущих измерений и моделью континуума MT_SKD-2.5 [13]. В целом видно хорошее согласие новых данных с результатами предыдущих аналогичных измерений [20]. Меньшее значение континуума в окнах прозрачности в новых измерениях по сравнению с данными [20] обусловлено калибровкой последних измерений по модели MT_SKD-2,5 в области 2500 см^{-1} .

Данные измерения не могут претендовать на высокую точность определения абсолютного значения непрерывного поглощения. Тем не менее они дают достаточно точное представление (с погрешностью $\sim 30\text{--}40\%$) об относительных величинах непрерывного поглощения в окнах прозрачности исследуемого диапазона. Результаты проведенных измерений подтверждают выводы работы [20] о том, что поглощение self-continuum в окнах прозрачности ближнего ИК-диапазона меняется от окна к окну гораздо слабее (не более $20\text{--}30\%$), чем предполагается в модели MT_SKD-2.5 [13].

Заключение

Таким образом, на сегодняшний день по-прежнему существует значительное противоречие между результатами разных измерений непрерывного поглощения как минимум в двух окнах прозрачности ближнего ИК: 4600 ($2,1 \text{ мкм}$) и 6300 см^{-1} ($1,6 \text{ мкм}$) [16, 20–22]. Причина этого разногласия может лежать как в физически принципиально разных методах измерения, используемых в экспериментах, так и в разном влиянии поверхностных эффектов (например, адсорбции кластеров воды на

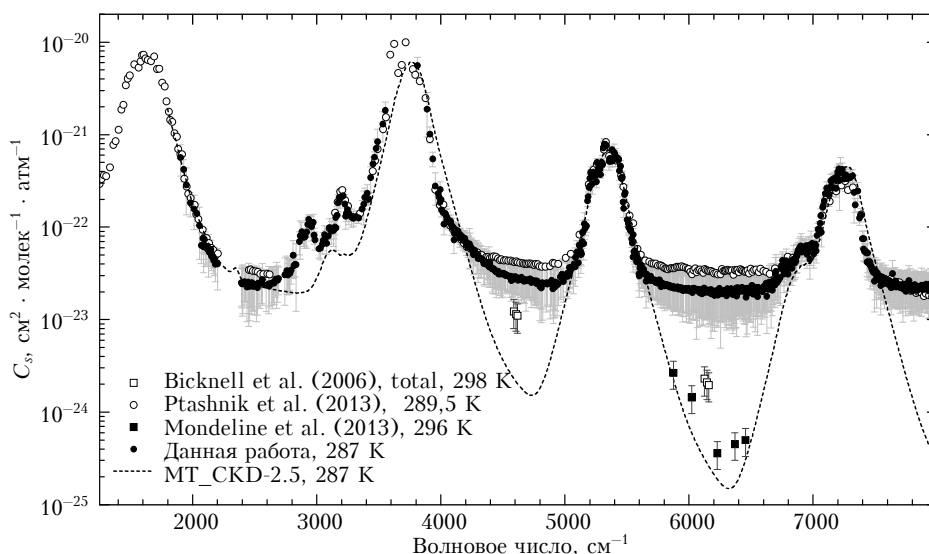


Рис. 4. Восстановленное в данной работе сечение поглощения self-continuum при $T = 287$ K показано в сравнении с результатами ранних измерений: Ptashnik et al. [20], Bicknell et al. [21] и Mondeline et al. [22]. Пунктиром показана модель континуума MT_CKD-2.5 [13]

стенках) при использовании кювет разных размеров (от полуметра в [20] до нескольких миллиметров в [22]). Для решения этой проблемы требуются дальнейшие исследования.

Прояснить ситуацию могли бы, например, измерения, аналогичные [22], но в окне 2500 см^{-1} (4 мкм), где величина континуального поглощения известна достаточно хорошо сегодня как из лабораторных, так и из спутниковых измерений. Полезными были бы также любые современные измерения континуального поглощения в окнах 2,1; 1,6 и 1,2 мкм на трассах длиной более 2–3 км, для обеспечения более высоких значений оптической толщи, чем было получено в настоящей работе (0,01), и соответственно меньшей погрешности. Основной проблемой полевых измерений континуума на длинных трассах является корректное исключение аэрозольной составляющей, «маскирующей» континуальное поглощение водяного пара.

Экспериментальная часть работы выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-05-00382, а численная обработка и анализ – при поддержке Программы фундаментальных научных исследований П.10.3.8 (проект ФНИ № 01201354620).

1. Held I.M., Soden B.J. Water vapor feedback and global warming // *Annu. Rev. Energy. Environ.* 2000. V. 25. P. 441–475.
2. Clough S.A., Iacono M.J., Moncet J.-L. Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates: application to water vapor // *J. Geophys. Res. D.* 1992. V. 97, N 14. P. 15761–15785.
3. Kilsby C.G., Edwards D.P., Saunders R.W., Foot J.S. Water-vapour continuum absorption in the tropics: Aircraft measurements and model comparisons // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1992. V. 118, N 506. P. 715–748.
4. Shine K.P., Ptashnik I.V., Rädcl G. The water vapour continuum: brief history and recent developments // *Surveys in Geophys.* 2012. V. 33, N 3–4. P. 535–555. DOI: 10.1007/s10712-011-9170-y.

5. Ma Q., Tipping R.H., Leforestier C. Temperature dependences of mechanisms responsible for the water-vapor continuum absorption: 1. Far wings of allowed lines // *J. Chem. Phys.* 2008. V. 128, N 12. P. 124313.
6. Bogdanova Ju.V., Rodimova O.B. Line shape in far wings and water vapor absorption in a broad temperature interval // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2010. V. 111. P. 2298–2307.
7. Vigasin A.A. Water vapour continuous absorption in various mixtures: possible role of weakly bound complexes // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2000. V. 64. P. 25–40.
8. Ptashnik I.V., Smith K.M., Shine K.P., Newnham D.A. Laboratory measurements of water vapour continuum absorption in spectral region $5000\text{--}5600 \text{ cm}^{-1}$: evidence for water dimers // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2004. V. 130, N 602. P. 2391.
9. Daniel J.S., Solomon S., Kjaergaard H., Schofield D.P. Atmospheric water vapour complexes and the continuum // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, N 6. P. L06118.
10. Ptashnik I.V. Evidence for the contribution of water dimers to the near-IR water vapour self-continuum // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2008. V. 109. P. 831–852.
11. Ptashnik I.V., Shine K.P., Vigasin A.A. Water vapour self-continuum and water dimers. 1. Analysis of recent work // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112. P. 1286–1303.
12. Baranov Yu.I., Lafferty W.J. The water vapour self- and water-nitrogen continuum absorption in the 1000 and 2500 cm^{-1} atmospheric windows // *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* 2012. V. 370, N 1968. P. 2578–2589. DOI: 10.1098/rsta.2011.0234.
13. Mlawer E.J., Payne V.H., Moncet J.-L., Delamere J.S., Alvarado M.J., Tobin D.D. Development and recent evaluation of the MT_CKD model of continuum absorption // *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* 2012. V. 370. P. 2520–2556. DOI: 10.1098/rsta.2011.0295.
14. Baranov Yu.I., Lafferty W.J., Fraser G.T., Ma Q., Tipping R.H. Water-vapor continuum absorption in the $800\text{--}1250 \text{ cm}^{-1}$ spectral region at temperatures from 311 to 363 K // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2008. V. 109. P. 2291–2302.

15. Cormier J.G., Hodges J.T., Drummond J.R. Infrared water vapour continuum absorption at atmospheric temperatures // *J. Chem. Phys.* 2005. V. 122, N 11. P. 114309.
16. Ptashnik I.V., McPheat R.A., Shine K.P., Smith K.M., Williams R.G. Water vapor self-continuum absorption in near-infrared windows derived from laboratory measurements // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. D16305.
17. Baranov Yu.I., Lafferty W.J. The water-vapour continuum and selective absorption in the 3 to 5 μm spectral region at temperatures from 311 to 363 K // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112. P. 1304–1313.
18. Baranov Yu.I. The continuum absorption in $\text{H}_2\text{O}+\text{N}_2$ mixtures in the 2000–3250 cm^{-1} spectral region at temperatures from 326 to 363 K // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112. P. 2281–2286.
19. Ptashnik I.V., McPheat R.A., Shine K.P., Smith K.M., Williams R.G. Water vapour foreign continuum absorption in near-infrared windows from laboratory measurements // *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* 2012. V. 370, N 1968. P. 2557–2577. DOI: 10.1098/rsta.2011.0218.
20. Ptashnik I.V., Petrova T.M., Ponomarev Yu.N., Shine K.P., Solodov A.A., Solodov A.M. Near-infrared water vapour self-continuum at close to room temperature // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 120. P. 23–35.
21. Bicknell W.E., Cecca S.D., Griffin M.K., Swartz S.D., Flusberg A. Search for Low-Absorption Regions in the 1.6- and 2.1- μm Atmospheric Windows // *J. Directed Energy.* 2006. V. 2, N 2. P. 151–161.
22. Mondelain D., Aradj A., Kassi S., Campargue A. The water vapour self-continuum by CRDS at room temperature in the 1.6 μm transparency window // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 130. P. 381–391.
23. Ponomarev Yu.N., Petrova T.M., Solodov A.M., Solodov A.A., Sulakshin S.A. A Fourier-spectrometer with a 30-m base-length multipass cell for the study of weak absorption spectra of atmospheric gases // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 6. P. 593–595.
24. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov I.E., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P.F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Chance K., Cohen E.A., Coudert L.H., Devi V.M., Drouin B.J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R.R., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J.T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R.J., Li G., Long D.A., Lyulin O.M., Mackie C.J., Massie S.T., Mikhailenko S., Müller S.P., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E.R., Richard C., Smith M.A.H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G.C., Tyuterev V.I.G., Wagner G. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 130. P. 4–50.
25. Mitsel A.A., Ptashnik I.V., Firsov K.M., Fomin A.B. Efficient technique for line-by-line calculating the transmittance of the absorbing atmosphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 1995. V. 8, N 11. P. 847–850.
26. Shillings A.J.L., Ball S.M., Barber M.J., Tennyson J., Jones R.L. An upper limit for water dimer absorption in the 750 nm spectral region and a revised water line list // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 9. P. 4273–4287.
27. Newman S.M., Green P.D., Ptashnik I.V., Gardiner P.D., Coleman M.D., McPheat R.A., Smith R.M. Airborne and satellite remote sensing of the mid-infrared water vapour continuum // *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* 2012. V. 370, N 1968. P. 2611–2636. DOI: 10.1098/rsta.2011.0223.

I.V. Ptashnik, T.M. Petrova, Yu.N. Ponomarev, A.A. Solodov, A.M. Solodov. Water vapour continuum absorption in the near-IR atmospheric windows.

Measurement of the near-infrared water vapour absorption is made in the spectral region 2000–8000 cm^{-1} at a temperature of 287 K on the basis of high-resolution Fourier spectrometry. The water vapour continuum absorption spectrum is retrieved using known absorption in 2500 cm^{-1} region as a reference point. It is shown that in the conditions under investigation the continuum absorption in four windows differ no more than by 20%. This is in contradiction with MT_CKD continuum model that predicts much stronger variability of the continuum in these windows.