

И.В. Пташник

Поглощение солнечной радиации водяным паром: возможные аномалии

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

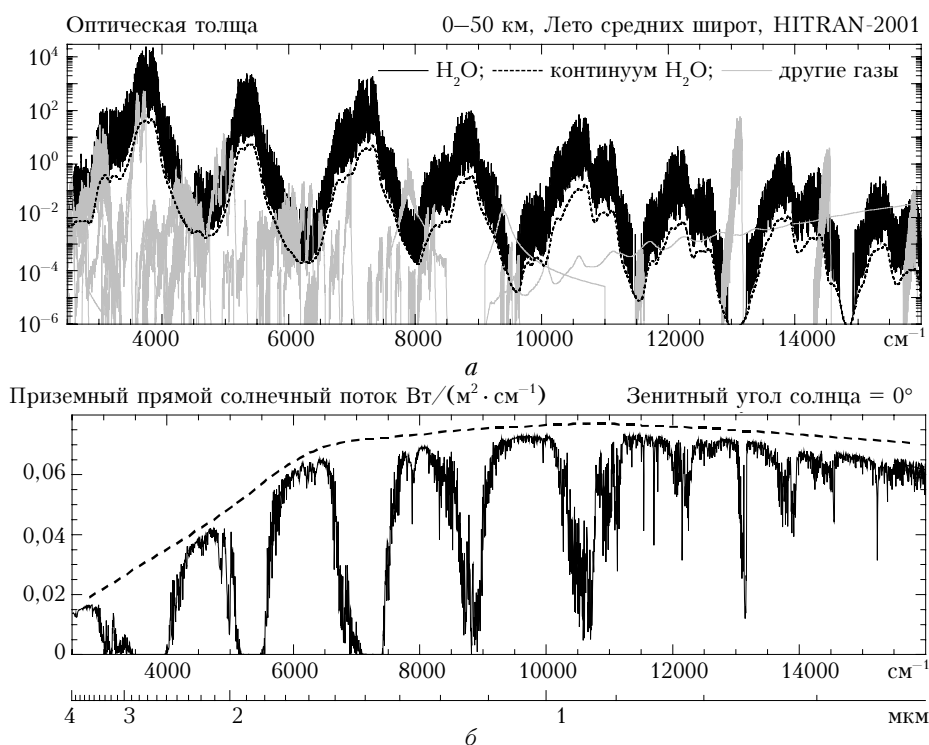
Поступила в редакцию 1.09.2004 г.

Проведен краткий анализ последних публикаций на тему о так называемом аномальном поглощении солнечной радиации в атмосфере и о возможном вкладе в этот эффект водяного пара. Приведенные оценки показывают, что неопределенность в знании исходных спектроскопических параметров водяного пара, включая димеры воды, может обусловить на сегодня лишь небольшую часть аномального поглощения солнечной радиации, обнаруженного несколько лет назад.

Введение

Около 8–9 лет назад появились первые сообщения о так называемом «аномальном поглощении» в атмосфере [1–5]. Было обнаружено, что в расчетах систематически недооценивается величина поглощенной в атмосфере солнечной радиации по сравнению с экспериментом. Разногласие в усредненной по глобусу (УГ) величине потока достигало 25 Вт/м^2 , что составляет ~30% от величины всей поглощаемой в атмосфере солнечной радиации ($\sim 80 \text{ Вт/м}^2$). Несмотря на многочисленные попытки, предпринятые за прошедшие годы, окончатель-

ного ответа на вопрос о причине этого разногласия так и не прозвучало. Более того, в последние годы наблюдается явный спад числа работ, в которых сообщалось бы об аномальном поглощении. Было выдвинуто множество возможных причин, объясняющих аномальное поглощение, но, поскольку данный эффект был обнаружен даже для случаев безоблачного неба [6], основными «подозреваемыми» были аэрозоль и водяной пар. Поглощение водяного пара, как видно из рисунка, доминирует над всеми другими газами, обуславливая до 90% всего поглощения в солнечном спектральном диапазоне.



Вклад водяного пара в поглощение солнечной радиации в атмосфере: *a* — оптическая толщина вертикального слоя атмосферы 0–50 км для поглощения водяным паром, отдельно континуумом воды и другими атмосферными газами; *b* — поток прямой солнечной радиации на поверхности с учетом поглощения водяным паром. Пунктиром показан поток на верхней границе атмосферы

В данной статье анализируются теоретические и экспериментальные работы последних лет с целью оценить возможный вклад водяного пара в аномальное поглощение. При этом под термином «аномальное поглощение» (АП) мы будем понимать не столько возможные *реальные* источники поглощения в атмосфере, не учитываемые на сегодняшний день, сколько просто неопределенность расчета поглощения солнечной радиации, обусловленную разными факторами.

К вопросу об аномальном поглощении

Обзор работ последних лет показывает, что имеет место существенное разногласие в вопросе как о возможной роли водяного пара в АП, так и о самом АП. Условно эти работы можно разделить на три группы.

1. Аркинг в своих работах [2,6] сообщает об обнаружении большого аномального поглощения ($17\text{--}28 \text{ Вт/м}^2$) и о сильной корреляции величины этого поглощения с интегральным в столбе атмосферы содержанием водяного пара. Этот факт может указывать на водяной пар как на основной источник АП. Подобная корреляция была также отмечена в работах [1, 4, 7].

2. В ряде других работ [5, 8] авторы сообщают о существенно меньшей величине АП (например, менее 7 Вт/м^2 в [5]) и об отсутствии какой-либо корреляции этого поглощения с содержанием водяного пара.

3. Наконец, в третьей группе работ, например в [9], сообщается об отсутствии какого-либо аномального поглощения в пределах экспериментальной погрешности ($\sim 5 \text{ Вт/м}^2$). При внимательном рассмотрении работы [9], как и некоторых работ из группы 2, можно отметить одно обстоятельство, которое отличает ее от работ из группы 1. Это обстоятельство заключается в том, что в работе [9] вначале, путем подгонки модельного потока к измеренному, определяются параметры аэрозольной модели. Затем эта подогнанная модель аэрозоля используется в расчете переноса радиации для сравнения с экспериментом. Иначе говоря, в работах группы 1 проводится сравнение эксперимента с расчетом, тогда как в работах группы 2 и 3 — сравнение эксперимента с расчетом, параметры которого предварительно подогнаны к эксперименту. Очевидно, что при таком подходе любое АП, имеющее гладкую спектральную зависимость, может быть частично (а в некоторых случаях и полностью) включено в подгоняемые параметры аэрозольной модели, даже если это АП не обусловлено в действительности аэрозольным поглощением.

Таким образом, данный подход вполне оправдан только в случае, когда есть абсолютная уверенность, что АП обусловлено только неточным учетом аэрозольного поглощения, либо когда АП имеет спектральную зависимость, существенно отличную от таковой для аэрозоля. Возможно, именно данное обстоятельство — повсеместным использованием подгонки неизвестных параметров модели — объясняется существенное сокращение в последние годы числа работ, где бы сообщалось о регистрации

АП. В качестве подтверждения этой мысли можно отметить, например, что в работе [10] авторы сообщают о наличии существенного разногласия измерений с расчетом «первоначально», но после подгонки параметров континуума воды эта разница становится незначительной.

Неопределенности учета поглощения H_2O

Одной из причин, а иногда и главной причиной разногласия в величине АП, детектируемого разными группами исследователей, является неопределенность в знании исходных спектроскопических параметров H_2O . Использование различных версий континуального поглощения воды или разных баз спектроскопических параметров разными группами может приводить к разным результатам. В работах [11–17], как и в ряде других работ, вышедших за последние 2–3 года, были рассмотрены возможные источники неопределенности в исходной спектроскопической информации по водяному пару и их влияние на расчет поглощаемой солнечной радиации в атмосфере. Ниже мы проведем их краткий анализ.

1. Постоянное обновление базы данных HITRAN, являющейся на сегодняшний день наиболее используемой базой параметров спектральных линий, приводит к тому, что модели расчета радиации различных исследовательских групп используют, как правило, разные версии базы HITRAN. Достаточно отметить, что за период 1992–2002 гг. вышло в свет 5 разных версий: HITRAN-92; HITRAN-96; HITRAN-96 с поправками Гивера и др. [18] (или HITRAN-99); HITRAN-2000 (или HITRAN-2k) и HITRAN-2001 (или HITRAN v. 11.0) [19].

В работах [13, 15] было показано, что максимальная разница в расчетном потоке солнечной радиации на поверхности возникает между вариантами использования базы HITRAN-96 и HITRAN-2001. Эта разница составляет $\sim 0,8 \text{ Вт/м}^2$ для зенитного угла солнца 30° и лета средних широт. Это соответствует примерно $0,27 \text{ Вт/м}^2$ УГ-потока.

2. Континуальное поглощение водяного пара — одна из часто дискутируемых возможных причин АП [6]. Помимо того что сама природа континуального поглощения до сих пор не имеет однозначного объяснения и существует несколько принципиально разных подходов к решению этой проблемы, имеет место также существенная количественная разница даже между разными версиями одной и той же модели континуума — СКД-модели (Clough, Kneizys, Davies) [20], наиболее часто используемой в настоящее время в радиационных блоках. Ситуация с обновлением СКД-модели еще более сложная, чем с базой данных HITRAN. Так, за последние 8 лет вышло в свет 8 апгрейтов СКД-модели континуума. При этом оцененная в работах [13, 15] разница в УГ-потоке солнечной радиации, обусловленная использованием в расчете разных последних версий СКД-континуума, составила до $0,9 \text{ Вт/м}^2$, или 1,1% от полного потока солнечной радиации, поглощаемой в атмосфере.

3. Еще одним возможным источником разногласия между разными радиационными кодами является учет/неучет слабых линий Партриджа–Швенке [21, 22]. Так, в [13, 15] показано, что неучет этих линий ведет к недооценке поглощаемого в атмосфере УГ солнечного потока до $\sim 0,9$ Вт/м². Этот результат хорошо согласуется также с оценками, полученными в работах [11, 12].

4. Несмотря на постоянные обновления базы данных HITRAN, по-прежнему остается дискуссионным вопрос о поглощении водяного пара в полосах 2ν (7100 см⁻¹), $2\nu + \delta$ (8800 см⁻¹), 3ν (10600 см⁻¹), $3\nu + \delta$ (12200 см⁻¹) и 4ν (13800 см⁻¹). Заявленная в работах [23, 24] альтернативная база спектральных линий воды ESA показывает существенно большее поглощение водяного пара в полосах $2\nu + \delta$, 3ν , $3\nu + \delta$ и 4ν (соответственно на 38, 6, 15 и 10%) по сравнению с HITRAN-99 [25]. Несмотря на многочисленные критические замечания в адрес базы ESA, повторные измерения в Rytherford Appleton Laboratory (Англия) в полосах 2ν и $2\nu + \delta$ подтвердили присутствие дополнительного по сравнению с HITRAN-2000 поглощения (соответственно на 12 и 15%) [14], хотя и существенно меньшего по величине для полосы $2\nu + \delta$, чем было заявлено первоначально в работах [23–25]. В работе [26] также сообщается о регистрации превышения интенсивностей спектральных линий в диапазоне 5800–7900 см⁻¹ по сравнению с HITRAN-2000 в среднем на 8%.

Оценка дополнительного вклада в поглощение коротковолновой радиации, обусловленного данными поправками к базе HITRAN, проведенная в работах [12, 14, 15], дает величину усредненного по глобусу потока $1,1\text{--}1,5$ Вт/м².

5. Еще один возможный источник аномального поглощения, связанный с водяным паром, – это поглощение комплексами воды. Тема комплексов (или кластеров) воды и их роли в атмосферном радиационном бюджете в последние годы переживает второе рождение [27–29]. Несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные исследования свойств простейшего комплекса воды – димера воды [30–33], только недавно появились первые сообщения о регистрации поглощения димеров в атмосфере (в спектральной области около 13300 см⁻¹) [34] и в лабораторных условиях, близких к атмосферным (около 5230 см⁻¹) [17].

В работах [16, 17, 30] сделаны численные оценки возможного вклада в поглощение атмосферной радиации, обусловленного димерами воды. Эти оценки, в целом, хорошо согласуются между собой и дают величину поглощаемого УГ потока от 0,6 до 1,5 Вт/м², в зависимости от ширины полос поглощения димеров, которая до настоящего времени является весьма неопределенным параметром и может варьироваться от 6 до 100 см⁻¹ для разных димерных полос [30].

Заключение

В сводной таблице приведены все рассмотренные выше погрешности расчета потока солнечной

радиации в атмосфере, обусловленные неточным знанием параметров поглощения водяного пара. Из таблицы видно, что максимальная погрешность, обусловленная всеми рассмотренными факторами, может достигать 4–5 Вт/м² усредненного по глобусу потока, или 5–6 % от общего поглощения солнечной радиации в атмосфере, что, несомненно, является большой величиной. Тем не менее эта погрешность не может объяснить АП 17–25 Вт/м², о котором сообщалось в работах Аркинга и др. для случая безоблачного неба. Скорее всего, такое АП было обусловлено совокупностью множества факторов, как рассмотренных в данной работе, так и других, включающих, например, неточный учет аэрозольного ослабления, неточность калибровки приборов и т.д.

Погрешности в расчете поглощаемой в атмосфере усредненной по глобусу солнечной радиации, обусловленные неопределенностью в исходной спектроскопической информации по водяному пару. Спектральный интервал 2 500–20 000 см⁻¹ (0,5–4 мкм)

Источник неопределенности	Погрешность, Вт/м ²	Доля от общего поглощения в атмосфере, %	Ссылки
HITRAN-2001–HITRAN-96	0,27	0,4	[13, 15]
HITRAN-2001–HITRAN-2000	0,2	0,3	
CKD 1–CKD 2,4 (континуум)	0,9	1,1	[13, 15]
Слабые линии Партриджа–Швенке	0,9	1,1	[12, 13, 15]
Поправки к HITRAN-2000	1,1–1,5	1,4–1,8	[12, 13, 15]
Поглощение димерами воды	0,6–1,5	0,8–1,8	[17, 30]
<i>Итого:</i>	3,8–5,1	4,8–6,2	

Автор благодарит Совет по исследованию окружающей среды Великобритании (грант NER/T/S/2001/00194) и К. Шайна за поддержку и плодотворные обсуждения.

1. Wild M., Ohmura A., Gilden H., Roeckner E. Validation of general circulation model radiative fluxes using surface observations // J. Climate. 1995. V. 8. P. 1309–1324.
2. Arking A. Absorption of solar energy in the atmosphere: discrepancy between model and observations // Science. 1996. V. 273. P. 779–782.
3. Ramanathan V., Vogelmann A.M. Greenhouse effect, atmospheric solar absorption and the Earth's radiation budget: From Arrhenius-Langley era to the 1990s // Ambio. 1997. V. 26. P. 38–46.
4. Kato S., Ackerman T.P., Clothiaux E.E., Mather J.H., Mace G.G., Wesley M.L., Murcray F., Michalsky J. Uncertainties in modelled and measured clear-sky surface shortwave irradiances // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102. N 22. P. 25881–25898.
5. Conant W.C., Vogelmann A.M., Ramanathan V. The unexpected solar absorption and atmospheric H₂O: a direct test using clear-sky data // Tellus. 1998. V. 50A. P. 525–533.
6. Arking A. Bringing climate models into agreement with observations of atmospheric absorption // J. Climate. 1999. V. 12. P. 1589–1600.

7. *Pilewskie P., Rabbette M., Bergstrom R., Marquez J., Schmid B., Russell P.B.* The discrepancy between measured and modelled downwelling solar irradiance at the ground: Dependence on water vapor // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. N 1. P. 137–140.
8. *Fu Q., Lesins G., Higgins J., Charlock T., Chylek P., Michalsky J.* Broadband water vapor absorption of solar radiation tested using ARM data // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. N 8. P. 1169–1172.
9. *Mlawer E.J., Brown P.D., Clough S.A., Harrison L.C., Michalsky J.J., Kiedron P.W., Shippert T.* Comparison of spectral direct and diffuse solar irradiance measurements and calculations for cloud-free conditions // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. N 17. P. 2653–2656.
10. *Han Y., Shaw J.A., Churnside J.H., Brown P.D., Clough S.A.* Infrared spectral radiance measurements in the tropical Pacific atmosphere // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102. N 4. P. 4353–4356.
11. *Learner R.C.M., Zhong W., Haigh J.D., Belmiloud D., Clarke J.* The contribution of unknown weak water vapor lines to the absorption of solar radiation // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. N 24. P. 3609–3612.
12. *Zhong W., Haigh J.D., Belmiloud D., Schermaul R., Tennyson J.* The impact of new water vapour spectral line parameters on the calculation of atmospheric absorption // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2001. V. 127. P. 1615–1626.
13. *Ptashnik I.V., Shine K.P.* Calculation of solar radiative fluxes in the atmosphere: the effect of updates in spectroscopic data // *Atmos. Oceanic Opt.* 2003. V. 16. N 3. P. 251–255.
14. *Smith K.M., Ptashnik I.V., Newnham D.A., Shine K.P.* Absorption by water vapour in the 1 to 2 μm region // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2004. V. 83. P. 735–749.
15. *Fomin B.A., Udalova T.A., Zhitnitskii E.A.* Evolution of spectroscopic information over the last decade and its effect on line-by-line calculations for validation of radiation codes for climate models // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2004. V. 86. P. 73–85.
16. *Kjaergaard H.G., Robinson T.W., Howard D.L., Daniel J.S., Headrick J.E., Vaida V.* Complexes of Importance to the Absorption of Solar Radiation // *J. Phys. Chem. A.* 2003. V. 107. P. 10680–10686.
17. *Ptashnik I.V., Smith K.M., Shine K.P., Newnham D.A.* Laboratory measurements of water vapour continuum absorption in spectral region 5000–5600 cm^{-1} : Evidence for water dimers // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* (in press).
18. *Giver L.P., Chackerian C.Jr., Varanasi P.* Visible and near-infrared H_2^{16}O line intensity corrections for HITRAN-96 // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2000. V. 66. P. 101–105.
19. *Rothman L.S., Barbe A., Chris Benner D., Brown L.R., Camy-Peyret C., Carleer M.R., Chance K., Clerbaux C., Dana V., Devi V.M., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Jucks K.W., Lafferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Nemtchinov V., Newnham D.A., Perrin A., Rinsland C.P., Schroeder J., Smith K.M., Smith M.A.H., Tang K., Toth R.A., Vander Auwera J., Varanasi P., Yoshino K.* The HITRAN molecular spectroscopic database: edition of 2000 including updates through 2001 // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2003. V. 82. P. 5–44.
20. *Clough S.A., Kneizys F.X., Davies R.W.* Line shape and water vapor continuum // *Atmos. Res.* 1989. V. 23. P. 229–241.
21. *Partridge H., Schwenke D.W.* The determination of an accurate isotope potential energy surface for water from extensive ab-initio calculation and experimental data // *J. Chem. Phys.* 1997. V. 106. P. 4618–4639.
22. *Schwenke D.W., Partridge H.* Convergence testing of the analytic representation of an ab-initio dipole moment function for water: Improved fitting yields improved intensities // *J. Chem. Phys.* 2000. V. 113. N 16. P. 6592–6597.
23. *Schermaul R., Learner R.C.M., Newnham D.A., Williams G.R., Ballard J., Zobov N.F., Belmiloud D., Tennyson J.* The water vapor spectrum in the region 8600–15000 cm^{-1} ; Experimental and theoretical studies for a new spectral line database I: Laboratory measurements // *J. Mol. Spectrosc.* 2001. V. 208. P. 32–42.
24. *Schermaul R., Learner R.C.M., Newnham D.A., Ballard J., Zobov N.F., Belmiloud D., Tennyson J.* The water vapor spectrum in the region 8600–15000 cm^{-1} ; Experimental and theoretical studies for a new spectral line database II: Linelist construction // *J. Mol. Spectrosc.* 2001. V. 208. P. 43–50.
25. *Belmiloud D., Schermaul R., Smith K.M., Zobov N.F., Brault J.W., Learner R.C.M., Newnham D.A., Tennyson J.* New studies of the visible and near-infrared absorption by water vapour and some problems with the HITRAN database // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. N 22. P. 3703–3706.
26. *Macko P., Romanini D., Mikhailenko S.N., Naumenko O.V., Kassi S., Campargue A., Jenouvrier A., Tyuterev V.I.G.* High Sensitivity CW-Cavity Ring Down Spectroscopy of water in the region of the 1.5 μm atmospheric window // *J. Mol. Spectrosc.* in press.
27. *Huisken F., Kaloudis M., Kulcke A.* Infrared spectroscopy of small size-selected water cluster ions // *J. Chem. Phys.* 1996. V. 104. N 1. P. 17–25.
28. *Paul J.B., Collier C.P., Saykally R.J., Scherer J.J., O'Keefe A.* Direct measurement of water cluster concentration by infrared cavity ringdown laser absorption spectroscopy // *J. Phys. Chem. A.* 1997. V. 101. N 29. P. 5211–5214.
29. *Evans G.T., Vaida V.* Aggregation of water molecules: Atmospheric implications // *J. Chem. Phys.* 2000. V. 113. N 16. P. 6652–6659.
30. *Vaida V., Daniel J.S., Kjaergaard H.G., Goss L.M., Tuck A.F.* Atmospheric absorption of near infrared and visible solar radiation by the hydrogen bonded water dimer // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2001. V. 127. P. 1627–1643.
31. *Goldman N., Fellers R.S., Leforestier C., Saykally J.* Water dimers in the atmosphere: Equilibrium constant for water dimerization from the VRT(ASP-W) potential surface // *J. Phys. Chem. A.* 2001. V. 105. N 3. P. 515–519.
32. *Perchard J.P.* Anharmonicity and hydrogen bonding. II – A near infrared study of water trapped in nitrogen matrix // *Chem. Phys.* 2001. V. 266. P. 109–124.
33. *Schofield D.P., Kjaergaard H.G.* Calculated OH-stretching and HOH-bending vibrational transitions in the water dimer // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2003. V. 5. P. 3100–3105.
34. *Pfeilsticker K., Lotter A., Peters C., Bosch H.* Atmospheric detection of water dimers via near-infrared absorption // *Science.* 2003. V. 300. P. 2078–2080.

I.V. Ptashnik. Absorption of solar radiation by water vapour: possible causes of anomalous absorption.

Recent publications concerning the so-called anomalous absorption of solar radiation in atmosphere and the possible contribution of water vapor to this effect are briefly analyzed. The estimates presented show that uncertainty in current knowledge of the initial water vapor spectroscopic parameters, including water dimer hypothesis, can contribute only a small part to the reported anomalous absorption.