

УДК: 551.510.42

СРАВНЕНИЯ ИК И МКВ НАЗЕМНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА

© 2016 г. И. А. Березин, Я. А. Виrolайнен, Ю. М. Тимофеев, А. В. Поберовский

*Санкт-Петербургский государственный университет
198504 Санкт-Петербург, Петергоф, ул. Ульяновская, 1*

E-mail: yana.virolainen@spbu.ru

Поступила в редакцию 09.02.2015 г., после доработки 27.02.2015 г.

Водяной пар, являясь одним из основных климатообразующих газов, играет ключевую роль в целом ряде процессов на различных высотах земной атмосферы. Сопоставления разных методов измерения общего содержания водяного пара (ОСВП) и их взаимная калибровка имеют важное значение для определения истинной точности методов, а также для совместного использования данных из различных источников, создания архивов данных различных измерений и т.д. На станции Санкт-Петербургского государственного университета в Петергофе (59.88° N, 29.82° E) проведены сопоставления ОСВП, полученные из спектроскопических измерений солнечного ИК-излучения (в полосе поглощения ~8–9 мкм) и собственного МКВ-излучения атмосферы (в линии поглощения 1.35 см) для 138 дней наблюдений в период с марта 2013 г. по июнь 2014 г. МКВ-измерения дают большие значения ОСВП, чем ИК-измерения, причем систематическое превышение достигает 8% при малых ОСВП. С ростом ОСВП отличие двух методов уменьшается и составляет при ОСВП большем 1 см ~1%. Среднеквадратичные отклонения (СКО) между двумя методами достигают 7% при значениях ОСВП, меньших 0.4 см. С ростом ОСВП СКО уменьшаются и при ОСВП большем 1 см составляют 3–5%. Приведенные данные свидетельствуют о высоком качестве обоих дистанционных методов, при этом ИК-измерения имеют преимущество в точности по сравнению с МКВ-измерениями при малых значениях ОСВП.

Ключевые слова: влагосодержание атмосферы, МКВ-метод, собственное излучение, ИК-метод, солнечное излучение, радиозондирование.

DOI: 10.7868/S0002351516030020

1. ВВЕДЕНИЕ

Водяной пар в атмосфере Земли играет уникальную роль в формировании погоды и климата. Являясь важнейшим естественным парниковым газом, он участвует в переносе скрытого тепла за счет процессов испарения и конденсации, в различных химических и фотохимических процессах, образовании и трансформации облаков и аэрозолей. Мониторинг пространственно-временных вариаций содержания водяного пара осуществляется как при помощи прямых измерений, так и дистанционными методами. В связи с этим важное значение имеет сравнение различных методов измерений общего содержания водяного пара (ОСВП) для их взаимных калибровок и объективных оценок точностных характеристик. В работе [1] дан обзор программ сопоставления различных методов измерения ОСВП, проведенных в последние два десятилетия в разных географических регионах. Для взаимных калибровок различных спутниковых измерений и создания

единой базы данных в 2009–2012 гг. выполнялся проект ESA DUE Global Vapour [2]. Различным наземным измерениям водяного пара посвящена монография [3]. Упомянем также работу [4], где проводились сравнения дистанционных методов измерения ОСВП и работу [5] по сопоставлениям радиозондовых и ИК спектроскопических измерений ОСВП.

2. АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОСВП

В работе анализируются результаты сопоставления наземных измерений ОСВП с помощью ИК-спектроскопического метода по прямому солнечному излучению и МКВ-метода по собственному тепловому излучению. Измерения ОСВП осуществлялись на физическом факультета СПбГУ (Петергоф, 59.88° N, 29.82° E), данные радиозондирования, с которыми также проводилось сопоставления результатов ИК-измерений ОСВП,

получены на станции в пос. Воейково (59.95° N, 30.70° E).

Спектры прямого солнечного ИК-излучения с высоким спектральным разрешением измерялись с помощью наземного спектрального комплекса на базе Фурье-спектрометра Bruker IFS-125HR [6]. Измерения проводились в условиях безоблачного неба либо в достаточно больших разрывах облаков. Определение влагосодержания осуществлялось в 6 спектральных интервалах (1110.00–1113.00) см⁻¹, (1117.30–1117.90) см⁻¹, (1120.10–1122.00) см⁻¹, (1196.00–1200.40) см⁻¹, (1220.50–1221.50) см⁻¹ и (1251.75–1253.00) см⁻¹. Интерпретация ИК-измерений проводилась с помощью программного комплекса PROFFIT [7]. Детали измерений описаны в работе [5]. В рассматриваемый период (март 2013 г.–июнь 2014 г.) по всем имеющимся в наличии спектральным измерениям солнечного излучения в окне прозрачности 8–12 мкм нами были получены данные по ОСВП для 138 дней. Для всего ансамбля из 936 единичных измерений полная погрешность измерения ОСВП по расчетам матриц ошибок составила (3.6 ± 0.6)%, при этом ее случайная компонента равнялась (1.2 ± 0.2)%, систематическая – (3.3 ± 0.6)%. Расчеты показали, что чем больше ОСВП, тем выше случайные абсолютные погрешности ИК-измерений, варьирующиеся от 0.005 см для значений ОСВП, меньших 0.4 см осажденной воды до 0.04 см для значений ОСВП, больших 2 см. В целом, относительная случайная погрешность измерения ОСВП за счет случайного шума измерений менялась мало, составляя около 1% по всему ансамблю.

Микроволновые измерения ОСВП проводились с помощью радиометра RPG-HATPRO (Radiometer Physics GmbH – Humidity And Temperature PRO filer) производства немецкой компании Radiometer Physics GmbH [8]. Радиометр имеет 7 каналов в области полосы поглощения кислорода и 7 каналов в области линии поглощения водяного пара 1.35 см. ОСВП определяется прибором с абсолютной погрешностью ± 0.03 см и случайной погрешностью менее 0.005 см [8]. Наши оценки флуктуаций ОСВП, измеряемые прибором при постоянных значений ОСВП в течение 5–15 мин, полностью подтвердили приведенные выше оценки случайных погрешностей. При малых значениях ОСВП (менее 0.4 см) относительные случайные погрешности МКВ составляют ~2%, полные погрешности могут достигать ~10–15%. Это обусловлено тем, что в используемой линии поглощения водяного пара атмосферное поглощение мало. При средних и больших ОСВП случайная погрешность МКВ-метода менее 1%. Исходя из приведенных цифр, МКВ-метод должен иметь некоторые преимущества по сравнению с ИК методом при значениях ОСВП, боль-

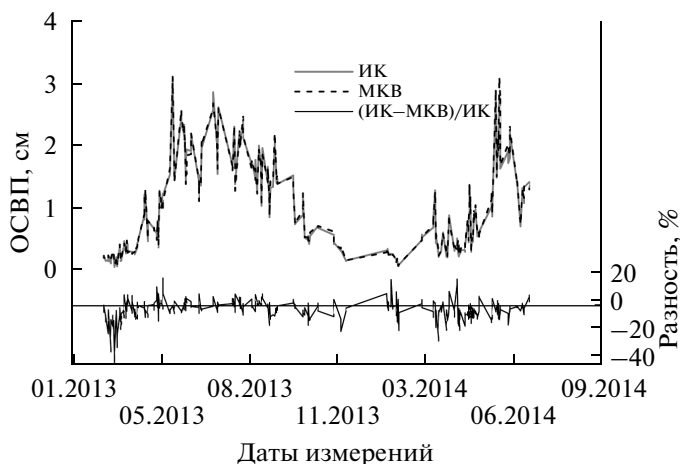


Рис. 1. Временной ход результатов измерения общего содержания водяного пара ИК- и МКВ-методами, а также их относительные разности.

ших 1 см. При малых величинах ОСВП несомненные преимущества имеет ИК-метод.

На станции радиозондирования Росгидромета в пос. Воейково осуществляются регулярные запуски радиозондов АК2-02, с помощью которых измеряют высотные профили относительной влажности, температуры и параметров ветра. Погрешность радиозондовых измерений содержания водяного пара в тропосфере в среднем составляет 5–10% [9–10]. Погрешности определения ОСВП радиозондом зависят от степени корреляции ошибок измерений влажности на различных уровнях и не могут превышать указанные погрешности для профиля влажности в тропосфере. Важно упомянуть, что расстояние между Петергофом и Воейково составляет ~50 км и рассогласования между радиозондовыми и измерениями в Петергофе могут быть в значительной мере обусловлены пространственно-временными вариациям содержания водяного пара [5].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЙ

Ансамбль сопоставлений ИК- и МКВ-измерений был максимально согласован по времени с учетом непрерывных МКВ-измерений с периодичностью в 2 с, результаты МКВ-измерений осреднялись за время проведения ИК-измерений (примерно 12 мин). На рис. 1 приведен временной ход за рассматриваемый период ИК- и МКВ-измерений ОСВП, а также их относительной разности. Временной ход самих значений ОСВП мало различим на графике, но, как видно из приведенной разности, в среднем рассогласование двух методов, как правило, находится в пределах 5–10%. Рисунок 2 представляет те же данные, но в виде диаграммы рассеяния одновременных изме-

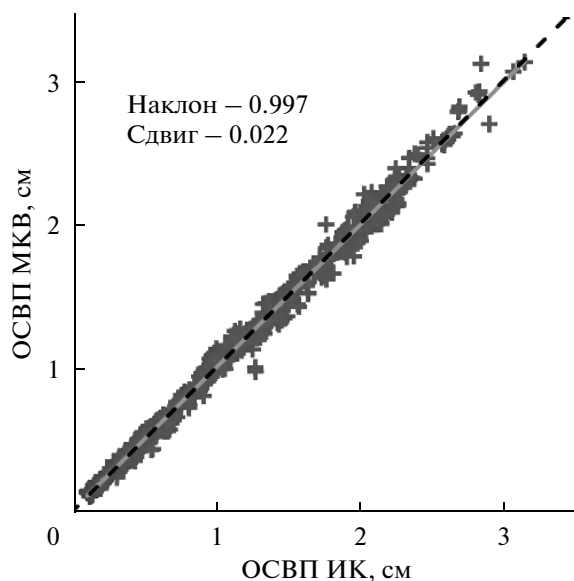


Рис. 2. Диаграмма рассеяния значений ОСВП, полученных ИК- и МКВ-методами.

рений ОСВП ИК- и МКВ-методами. На рис. 2 также приведена величина наклона ИК- к МКВ-измерениям, которая близка к единице, что говорит о том, что абсолютные рассогласования двух методов измерения ОСВП не зависят от самой величины ОСВП. Величина сдвига МКВ-измерений ОСВП относительно ИК (0.022 см) указывает на то, что МКВ-измерения в целом превышают ИК-измерения ОСВП. Из рис. 2 также видно, что чем выше абсолютные значения ОСВП, тем сильнее разброс между ИК- и МКВ-измерениями.

Для более подробного анализа были сформированы подансамбли для четырех диапазонов ОСВП: менее 0.4 см, 0.4–1.0 см, 1.0–2.0 см и более 2 см. Основные статистические характеристики рассогласований ИК- и МКВ-измерений для различных ансамблей ОСВП приведены в таблице.

Отмеченные на рисунке особенности количественно проявляются в средних рассогласованиях

ях. Для ансамблей ОСВП менее 0.4 см МКВ-метод дает значения на 8% большие, чем ИК-метод; для ансамблей 0.4–1.0 см на 4%, а для ансамблей 1.0–2.0 см и ОСВП, больших 2 см, – на ~1%. При рассмотрении абсолютных рассогласований видно, что практически для всех подансамблей (за исключением ансамбля со значениями ОСВП в пределах 1–2 см) МКВ-метод “завышает” получаемые значения ОСВП по сравнению с ИК-методом примерно на 0.02 см, что находится в пределах оцениваемой абсолютной погрешности МКВ-метода в 0.03 см [8]. Это систематическое рассогласование может быть вызвано погрешностями в задании спектроскопической информации в линии водяного пара 1.35 см. Так, по оценкам в базе данных HITRAN2008[11] эта погрешность для интенсивности линии составляет ~1%, полуширины – ~20%. Среднеквадратичные отклонения (СКО) от средних рассогласований в относительных единицах уменьшаются с ростом значений ОСВП с 7% до 3%. Коэффициенты корреляции между двумя дистанционными измерениями составляют для различных подансамблей ОСВП от 0.960 ± 0.007 до 0.981 ± 0.002 .

Сравнения результатов ИК-измерений ОСВП в Петергофе с радиозондовыми измерениями в пос. Воейково подтвердили выводы работы [5] о том, что пространственные вариации содержания водяного пара вносят значительный вклад в величины отличий. Коэффициент корреляции между ИК- и радиозондовыми измерениями оказался равен 0.945 ± 0.004 , среднее рассогласование – 0.005 см, однако СКО при этом составляет ~0.24 см (около 25%). Отметим, что кроме пространственных различий имеют место также временные – для получения достаточно представительного ансамбля мы сравнивали индивидуальные ИК-измерения ОСВП, полученные в пределах 3 часов от времени запуска радиозонда. Таким образом, 582 ИК-измерения ОСВП были сопоставлены с данными 105 радиозондов (105 дней в 2013–2014 гг.).

Характеристики рассогласования для четырех подансамблей значений ОСВП (в качестве рассогласования взяты средние значения и среднеквадратичные отклонения от средних)

Ансамбль	Число сопоставлений	Абсолютное рассогласование, см	Относительное рассогласование, %	Коэффициент корреляции
ОСВП < 0.4 см	266	-0.021 ± 0.020	-8 ± 7	0.971 ± 0.004
1 см < ОСВП < 0.4 см	280	-0.025 ± 0.039	-4 ± 6	0.981 ± 0.002
1 см < ОСВП < 2 см	236	-0.012 ± 0.067	-1 ± 5	0.971 ± 0.004
ОСВП > 2 см	132	-0.019 ± 0.077	-0.8 ± 3.0	0.960 ± 0.007

Сопоставления различных дистанционных измерений ОСВП проводились во многих работах. При этом сравнивались такие методы, как радиорефракционный (GPS), измерение поглощения прямой солнечной радиации в БИК-области различными фотометрами, измерение поглощения солнечного излучения в ИК-областях спектра Фурье-спектрометрами, МКВ собственного излучения атмосферы, лидарный, различные радиозонды, а также различные спутниковые методы и приборы [3]. Непосредственных сравнений ИК- и МКВ-измерений осуществлено относительно немного. Так, в работах [1, 12] проводились сопоставления измерений ОСВП с помощью ИК- и МКВ-методов. Однако МКВ-измерения осуществлялись приборами, предназначенными не для измерения содержания водяного пара, а для измерения содержания других газов, в частности озона. Определение ОСВП в этих экспериментах проводилось для исключения влияния тропосферного водяного пара на атмосферное излучение в линии излучения озона. В связи с этим точности МКВ-измерений ОСВП не были оптимальными. Средние рассогласования между МКВ- и ИК-измерениями ОСВП находились в пределах от -1.9% (-0.02 см) до 22.8% (0.09 см), СКО – от 12.8% (0.092 см) до 29.3% (0.108 см).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены сопоставления ИК-спектроскопического метода измерений ОСВП по прямому Солнцу и МКВ-метода измерений собственного излучения атмосферы для 138 дней наблюдений в период с марта 2013 г. по июнь 2014 г. в Петергофе (59.88° N, 29.82° E). Оба метода измерений были максимально согласованы по времени. Показано, что МКВ-измерения дают большие значения ОСВП чем ИК-измерения, причем это превышение достигает 8% при малых ОСВП. С ростом ОСВП это отличие уменьшается и составляет при ОСВП более 1 см $\sim 1\%$. Стандартные отклонения между двумя методами достигают 7% при значениях ОСВП менее 0.4 см. С ростом ОСВП оно уменьшается и при ОСВП более 1 см составляет $3\text{--}5\%$. Приведенные данные свидетельствуют о высоком качестве дистанционных измерений, при этом ИК-измерения имеют преимущества по сравнению с МКВ измерениями (линия поглощения 1.35 см) при малых значениях ОСВП. Отличия результатов измерения ОСВП в Петергофе от данных радиозондирования в пос. Воейково (59.95° N, 30.70° E) существенно больше (СКО составляют $\sim 25\%$), что подтверждает выводы работы [5] о значительном влиянии пространственно-временных вариациях водяного пара на величины рассогласований.

Экспериментальные исследования проведены на аппаратуре РЦ “Геомодель” СПбГУ. Сбор и обработка данных выполнены за счет финансирования по гранту Российского научного фонда № 14-17-00096. Анализ результатов осуществлен при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-05-07524.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Buehler S.A., Ostman S., Melsheimer C. et al. A multi-instrument comparison of integrated water vapour measurements at a high latitude site // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12. P. 10925–10943, doi: 10.5194/acp-12-10925-2012
2. Glob Vapour Newsletter. 2012. V. 4. Iss. 1. P. 1–8. (URL www.globalvapour.info)
3. Monitoring Atmospheric Water Vapour Ground-Based Remote Sensing and In-situ Methods. Series: ISSI Scientific Report Series / Ed. Kämpfer N. 2013. V. 10. № VIII. 326 p.
4. Пеннер И.Э., Балин Ю.С., Макарова М.В. и др. Измерения содержания водяного пара различными методами. Сравнения профилей водяного пара и аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 8. С. 728–738.
5. Семенов А.О., Виролайн Я.А. Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. Сравнение наземных ИК-спектроскопических измерений общего содержания водяного пара с данными радиозондовых измерений // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 11. С. 976–980.
6. Поберовский А.В. Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 01. С. 56–58
7. Hase F., Hannigan J.W., Coffey M.T. et al. Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution, ground-based FTIR measurements // J. Quant. Spectrosc. Rad. Transf. 2004. № 87. P. 2.
8. Rose Th., Czekala H. Accurate Atmospheric Profiling with the RPG-HATPRO Humidity – and Temperature Profiler. Meckenheim: RPG, 2005. 20 p.
9. Фридзон М.Б., Ермошенко Ю.М. Радиозондирование атмосферы // Мир измерений. 2009. № 7. URL: <http://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=30717>
10. <http://www.zondr.ru/development.html>
11. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A. et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // J.Q.S.R.T. 2009. V. 110. № 9–10. P. 533–572.
12. Palm C., Melsheimer S., Noel S. et al. Schrems Integrated water vapor above NyAlesund, Spitsbergen: a multi-sensor intercomparison // Atmos. Chem. Phys. 2010. № 10. P. 1215–1226. www.atmos-chem-phys.net/10/1215/2010/

The Comparison of IR and MW Ground-Based Measurements of Total Precipitable Water

I. A. Berezin, Ya. A. Virolainen, Yu. M. Timofeyev, and A. V. Poberovskii

St. Petersburg State University, ul. Ul'yanovskaya 1, Peterhof St. Petersburg, 198504 Russia

e-mail: yana.virolainen@spbu.ru

Received February 9, 2015; in final form, February 27, 2015

Abstract—Water vapor is one of the basic climate gases playing a key role in various processes at different altitudes of the Earth's atmosphere. An intercomparison and validation of different total precipitable water (TPW) measurement methods are important for determining the true accuracy of these methods, the shared use of data from multiple sources, the creation of data archives of different measurements, etc. In this paper, the TPW values obtained from solar IR spectral measurements ($\sim 8\text{--}9\ \mu\text{m}$ absorption band) and intrinsic MW radiation of the atmosphere (1.35 cm absorption line) for 138 days of observation are compared. Measurements have been carried out from March 2013 at Peterhof station of the St. Petersburg State University in ($59.88^\circ\ \text{N}$, $29.8^\circ\ \text{E}$). It is shown that MW measurements usually give higher TPW values than IR measurements. The bias between the two methods varies from 1 to 8% for small and large TPW values, respectively. With increasing TPW values, the bias reduces and for $\text{TPW} > 1\ \text{cm}$ it is $\sim 1\%$. Standard deviation (SD) between the two methods reaches 7% for $\text{TPW} < 0.4\ \text{cm}$ and 3–5% for $\text{TPW} > 1\ \text{cm}$. These data show the high quality of both remote sensing methods. Moreover, the IR measurements have a higher accuracy than MW measurements for small TPW values.

Keywords: total precipitable water, MW method, intrinsic radiation, IR method, solar radiation, radiosounding