

УДК: 551.510.42

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРЫ ФОТОМЕТРОМ CIMEL

© 2017 г. И. А. Березин<sup>а</sup>, Ю. М. Тимофеев<sup>а</sup>, Я. А. Виrolайнен<sup>а, \*</sup>, И. С. Французова<sup>а</sup>, К. А. Волкова<sup>а</sup>, А. В. Поберовский<sup>а</sup>, Б. Н. Холбен<sup>б</sup>, А. В. Смирнов<sup>б</sup>, И. Слуцкер<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет  
199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

<sup>б</sup>Центр космических полетов им. Годдарда  
г. Гринбелт, штат Мэриленд, 20771, США

\*E-mail: yana.virolainen@spbu.ru

Поступила в редакцию 05.06.2015 г.

После доработки 27.11.2015 г.

Водяной пар играет ключевую роль в формировании погоды и климата, что приводит к необходимости постоянного мониторинга его содержания в различных местах земного шара. Для получения истинных оценок точности измерений важно своевременно сопоставлять и калибровать существующие методы и приборы. Прибор CIMEL, функционирующий на нескольких сотнях наземных станций сети AERONET, позволяет определять общее содержание водяного пара (ОСВП). Для условий пригорода Санкт-Петербурга анализируются одновременные измерения ОСВП фотометром CIMEL, МКВ радиометром, ИК Фурье-спектрометром, а также радиозондами (станция Воейково). Совместный анализ практически одновременных измерений с использованием различных дистанционных методов позволяет оценить качество измерений фотометра CIMEL при его калибровке фирмой-изготовителем. Показано, что прибор CIMEL занижает ОСВП по сравнению с МКВ- и ИК-измерениями. С учетом взаимного согласования последних это занижение свидетельствует о необходимости проведения дополнительной калибровки прибора CIMEL и, возможно, коррекции методик и алгоритмов интерпретации измерений фотометра CIMEL для условий Санкт-Петербурга.

**Ключевые слова:** влагосодержание атмосферы, сеть AERONET, фотометр CIMEL, МКВ-метод собственного излучения, ИК-метод солнечного излучения

**DOI:** 10.7868/S0002351517010035

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Международная наземная сеть AERONET (Aerosol Robotic Network) включает в себя несколько сотен пунктов наблюдений на различных континентах земного шара, в которых проводятся измерения оптических и микрофизических параметров атмосферного аэрозоля с помощью фотометра CIMEL [1]. В России имеется не менее восьми таких пунктов [2]. Кроме характеристик аэрозолей, на сети AERONET фотометром CIMEL измеряется также общее содержание водяного пара (ОСВП). Спектроскопические методы определения ОСВП развиваются в России уже длительное время [3, 4]. Данные по влагосодержанию атмосферы получают с помощью анализа измерений прямого солнечного излучения в полосе поглощения водяного пара 940 нм спектрофотометрами CIMEL и другими приборами подобного типа (например, MFRSR). Для различного применения получаемых данных по ОСВП требуется знание погрешностей этих измерений. Так, в ра-

боте [5] указано, что погрешности измерений ОСВП фотометром MFRSR составляют в среднем ~10%. Однако эти погрешности зависят от многих факторов, и их анализ для различных условий измерений и различных приборов (например, различных значений ОСВП, сезонов, высот измерений, качества калибровки и т.д.) представляет значительный интерес. Подобные исследования погрешностей измерения фотометром CIMEL в разных условиях были описаны, например, в работах [6–12] и монографии [13]. С 2013 г. измерения с помощью фотометра CIMEL, откалиброванного изготовителем прибора, начаты в Санкт-Петербургском университете (СПбГУ) в условиях пригорода Санкт-Петербурга (Петергоф: 59.88° N, 29.82° E). В работе анализируются одновременные измерения ОСВП фотометром CIMEL, МКВ радиометром, ИК Фурье-спектрометром, а также данные радиозондирования (станция Воейково) за период более года. Совместный анализ практически одновременных измерений различных дистан-

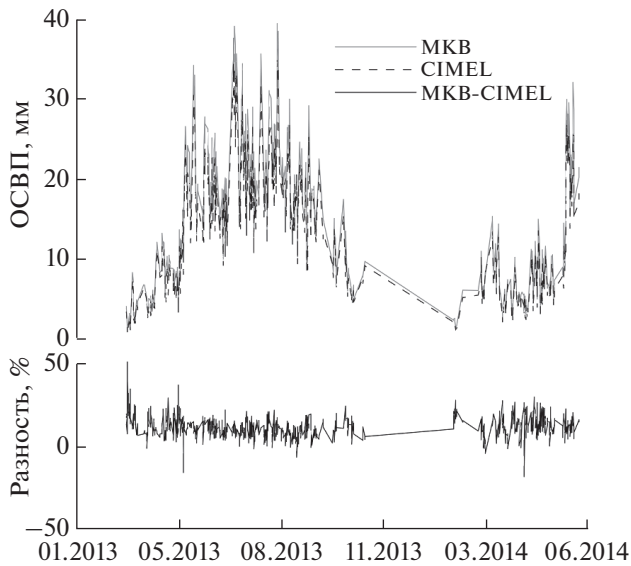


Рис. 1. Временной ход величин ОСВП, измеренных МКВ радиометром RPG-HATPRO и фотометром CIMEL, а также их относительная разность.

ционных методов позволяет оценить качество измерений фотометра CIMEL.

## 2. ДЕТАЛИ ИЗМЕРЕНИЙ

Автоматический фотометр CIMEL CE 318N-EDPS9 измеряет прямое солнечное излучение в полосе поглощения водяного пара в спектральном канале с центром на длине волны 940 нм. На основе калибровки прибора фирмой изготовителем (Cimel Electronique S.A.S, сайт <http://www.cimel.fr/>) и стандартизованных алгоритмов Центра космических полетов им. Годдарда были получены ОСВП за период с 13.03.2013 по 31.05.2014 гг. [14]. Длительность единичного измерения фотометра, которое используется для определения ОСВП, составляла 1 минуту, а алгоритмы обработки исключали случаи измерений при наличии облаков. В настоящей работе анализируются данные по ОСВП уровня 1.5. Как показано в работе [15], эти данные по качеству определяемого ОСВП не отличаются существенно от данных уровня 2.0.

Микроволновые измерения ОСВП проводились с помощью радиометра RPG-HATPRO (Radiometer Physics GmbH – Humidity And Temperature PROfiler) производства немецкой компании Radiometer Physics GmbH [16]. Радиометр имеет семь каналов в области полосы поглощения кислорода 0.5 см и семь каналов в области линии поглощения водяного пара 1.35 см и атмосферных окон прозрачности. Радиометр позволяет определять вертикальные профили температуры и влажности в тропосфере, а также водность обла-

ков [17, 18]. ОСВП определяется прибором с абсолютной погрешностью  $\pm 0.3$  мм осажденной воды и случайной погрешностью менее 0.05 мм [16]. Анализ флуктуаций ОСВП, измеряемых прибором при постоянных значений ОСВП в течение 5–15 минут, подтвердил полностью приведенные выше оценки случайных погрешностей. При малых значениях ОСВП (менее 4 мм) относительные случайные погрешности МКВ составляют  $\sim 2\%$ , полные погрешности могут достигать  $\sim 10\text{--}15\%$ .

Спектры прямого солнечного ИК-излучения с высоким спектральным разрешением измерялись с помощью наземного спектрального комплекса на базе Фурье-спектрометра Bruker IFS-125HR [19]. Измерения проводились в случае безоблачного неба либо в достаточно больших разрывах облаков. Определение влагосодержания осуществлялось в 6-ти спектральных интервалах ( $1110.00\text{--}1113.00$ )  $\text{cm}^{-1}$ , ( $1117.30\text{--}1117.90$ )  $\text{cm}^{-1}$ , ( $1120.10\text{--}1122.00$ )  $\text{cm}^{-1}$ , ( $1196.00\text{--}1200.40$ )  $\text{cm}^{-1}$ , ( $1220.50\text{--}1221.50$ )  $\text{cm}^{-1}$  и ( $1251.75\text{--}1253.00$ )  $\text{cm}^{-1}$ . Интерпретация ИК-измерений была проведена с помощью программного комплекса PROFFIT [20]. Детали измерений и их обработки описаны в работе [21]. Погрешность измерения ОСВП по расчетам матриц ошибок составила  $(3.6 \pm 0.6)\%$ , при этом ее случайная компонента равнялась  $(1.2 \pm 0.2)\%$ , систематическая –  $(3.3 \pm 0.6)\%$ . Расчеты показали, что чем больше ОСВП, тем выше случайные абсолютные погрешности ИК-измерений, варьирующие от 0.05 мм (при ОСВП < 4 мм) до 0.4 мм (при ОСВП > 20 мм). В целом, относительная случайная погрешность измерения ОСВП за счет случайного шума измерений менялась мало, составив около 1% по всему ансамблю измерений.

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 не превосходит 5–10% [22]. Важно упомянуть, что расстояние между Петергофом и Воейково составляет  $\sim 50$  км, и рассогласования между радиозондовыми и измерениями в Петергофе могут быть в значительной мере обусловлены пространственно-временными вариациями содержания водяного пара [23, 24].

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЙ

На рис. 1 приведен пример сопоставлений измерений ОСВП с помощью фотометра CIMEL и МКВ радиометра. Из рисунка видно, что фотометр дает систематически более низкие значения

ОСВП по сравнению с измерениями МКВ радиометра. На этом же рисунке приведены рассогласования (в процентах, приведенные к МКВ измерениям) между двумя ансамблями. Отметим, что 38% процентов всех разностей меньше 10%, а 93% всех разностей меньше 20%. Напомним, что радиометр RPG-HATPRO проводит порядка 30–50 тысяч измерений в сутки (примерно каждые 2 секунды). Каждому значению CIMEL сопоставлялось МКВ значение ОСВП, осредненное за 1 минуту, т.е. два типа измерений были максимально согласованы по времени, при этом сами приборы находились на расстоянии ~3 м друг от друга. Однако следует учесть, что МКВ радиометр измеряет ОСВП в вертикальном направлении, а прибор CIMEL направлен на диск Солнца. Таким образом, при идеальном временном соответствии два сопоставляемых измерения имеют пространственные отличия, особенно значительные при низком Солнце. Эта особенность может способствовать появлению рассогласований в измерениях в силу мелкомасштабной изменчивости содержания водяного пара [23, 24].

Поведение абсолютных разностей (МКВ минус CIMEL) от величины ОСВП, измеренной фотометром CIMEL, приведено на рис. 2. Из рисунка видно, что разность между измерениями двумя приборами увеличивается с ростом ОСВП. Отметим также, что разность между двумя типами измерений быстрее растет при значениях ОСВП, больших 20 мм. Для этих же величин ОСВП возрастает и общий разброс разностей. В то же время подавляющее большинство реализаций ОСВП приходится на величины, меньшие 20 мм. Таким образом, увеличение разности между измерениями МКВ и CIMEL при больших значениях влагосодержания не сильно влияет на общую статистику сопоставлений.

Приведем также для иллюстрации гистограмму распределения относительной разности между данными МКВ радиометра и фотометра CIMEL для всего диапазона изменения величин влагосодержания (рис. 3). Основным выводом из проведенных сопоставлений является то, что, за исключением нескольких случаев измерений 8 мая 2013 г. и 7 апреля 2014 г., когда отдельные измерения CIMEL значительно превышали МКВ измерения (до ~20%), для всех поддиапазонов ОСВП CIMEL дает меньшие значения ОСВП по сравнению с МКВ радиометром.

Для более детального анализа сопоставления двух методов измерений ОСВП в табл. 1 приведены основные статистические характеристики рассогласований в целом от всего ансамбля, а также по отдельности для поддиапазонов изменений величин ОСВП. В качестве критерия расхождения ансамблей в табл. 1 приведены средние рассогласования, стандартные отклонения от средних, а также

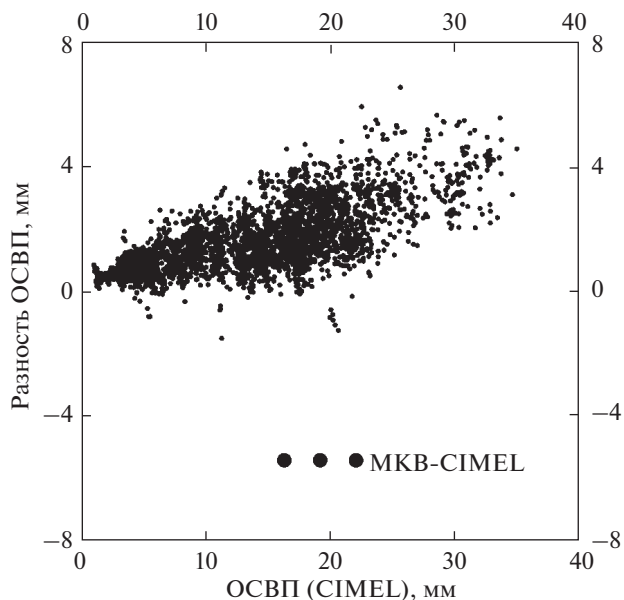


Рис. 2. Зависимость абсолютной разности (МКВ минус CIMEL) от величины ОСВП, измеренной прибором CIMEL.

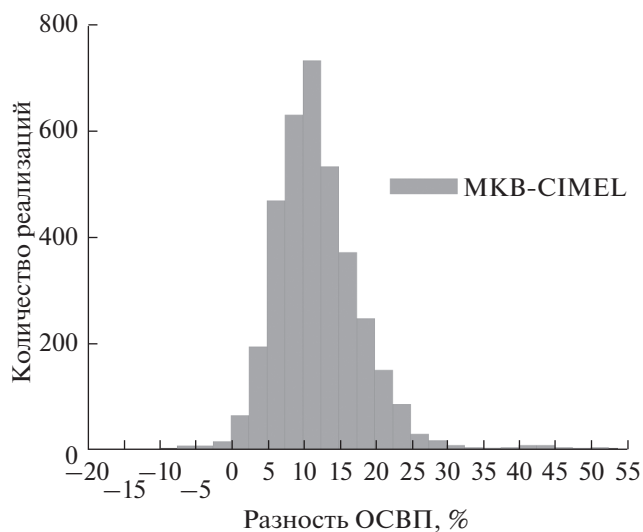


Рис. 3. Гистограмма распределения относительных разностей ОСВП (МКВ минус CIMEL).

коэффициенты корреляции. Характеристики рассогласований даны как в абсолютных (мм осажденной воды), так и в относительных (процентах) единицах.

Как видно из таблицы, для всех рассмотренных поддиапазонов наблюдается значительное систематическое рассогласование величин ОСВП по данным измерений двух приборов. Прибор CIMEL занижает значения ОСВП по сравнению

**Таблица 1.** Характеристики сопоставления ансамблей величин ОСВП, измеренных МКВ радиометром НАТPRO и фотометром CIMEL (в качестве рассогласования взяты средние значения НАТPRO – CIMEL и среднеквадратичные отклонения от средних)

Ансамбль ОСВП	Количество сопоставлений	Абсолютное рассогласование, мм	Относительное рассогласование, %	Коэффициент корреляции
Все измерения	3563	$1.56 \pm 1.07$	$10.9 \pm 7.4$	$0.9962 \pm 0.0001$
<4 мм	426	$0.51 \pm 0.17$	$18.4 \pm 6.2$	$0.979 \pm 0.002$
4–10 мм	873	$0.83 \pm 0.45$	$12.7 \pm 6.9$	$0.966 \pm 0.002$
10–20 мм	1311	$1.54 \pm 0.73$	$9.9 \pm 4.7$	$0.968 \pm 0.002$
>20 мм	953	$2.72 \pm 1.01$	$10.9 \pm 4.0$	$0.977 \pm 0.001$

**Таблица 2.** Характеристики сопоставления ансамблей величин ОСВП, измеренных ИК-спектрометром Bruker и фотометром CIMEL (Bruker минус CIMEL)

Временное согласие ансамблей	Количество сопоставлений	Абсолютное рассогласование, мм	Относительное рассогласование, %	Коэффициент корреляции
5 мин	262	$1.06 \pm 0.80$	$10.0 \pm 7.6$	$0.9982 \pm 0.0002$
60 мин	1094	$1.11 \pm 0.94$	$10.1 \pm 8.6$	$0.9952 \pm 0.0003$

с МКВ измерениями. В относительных единицах это занижение сильнее проявляется при малых величинах ОСВП (менее 4 мм). С ростом ОСВП относительные рассогласования, как правило, уменьшаются. Минимальное среднее рассогласование наблюдается для поддиапазонов ОСВП больше 10 мм. В то же время абсолютные расхождения растут с ростом самих величин ОСВП.

Стандартные отклонения от средних рассогласований для всех ансамблей невелики как в абсолютных, так и относительных единицах. Отметим, что очень высокий коэффициент корреляции между двумя типами измерений для полного ансамбля сопоставлений обусловлен большим числом практически повторяющихся измерений (число измерений прибором CIMEL в течение дня достигает 50). При рассмотрении отдельных поддиапазонов изменения ОСВП видно, что корреляции минимальны для величин ОСВП, находящихся в пределах от 4 до 10 мм.

При сравнениях ИК-измерений с измерениями прибора CIMEL было сформировано два ансамбля сопоставлений для различных условий временного согласия двух типов измерений – в течение 5 минут и 1 часа. Величины рассогласований для этих двух ансамблей приведены в табл. 2.

Отметим, прежде всего, что использование различных временных интервалов согласования двух типов измерений приводит к существенному росту числу сопоставлений, но относительно слабо влияет на величины рассогласований.

Как следует из табл. 2, измерения CIMEL, как и раньше, занижают значения ОСВП по сравнению с ИК-методом. Сравнивая приведенные в

табл. 2 данные с данными табл. 1 для всего ансамбля сравнений приборов CIMEL и МКВ радиометра, следует обратить внимание на близость характеристик рассогласований в двух типах сопоставлений. Из этого сравнения видно, что два разных дистанционных метода (метод ИК прозрачности атмосферы и метод МКВ теплового излучения) и два различных прибора указывают на значительное занижение значений ОСВП по измерениям CIMEL – в среднем на 10–11% или 1.1–1.6 мм. Отметим также, что систематические отличия CIMEL от МКВ измерений несколько больше, чем отличия CIMEL от ИК-измерений. Независимые сопоставления МКВ- и ИК-измерений на станции СПбГУ в Петергофе показали, что МКВ радиометр дает большие значения ОСВП чем ИК-измерения, причем это превышение составляет 1–8% для разных поддиапазонов значений ОСВП.

При сравнениях данных измерений фотометром CIMEL с данными измерений радиозондов было сформировано два ансамбля: измерения CIMEL, отличающиеся от радиозондов по времени не более чем на 15 минут, и измерения, отличающиеся по времени не более чем на час. В первом случае было 135 сопоставлений, во втором – 470. Относительные рассогласования между двумя типами измерений менялись от 0.08% до 124%. Причем 68% всех разностей были меньше 20% (85% – меньше 40%). Отличия во временном согласовании измерений не повлияли существенно на статистические характеристики расхождений ансамблей. Отличительной особенностью сравнений измерений ОСВП радиозондами и фото-

**Таблица 3.** Примеры сопоставления измерений ОСВП солнечными фотометрами и другими приборами

Приборы	<i>N</i>	Средние отклонения, мм (%)	Стандартные отклонения, мм (%)	<i>R</i>	Примечания
МКВ и 4 фотометра	488	0.6–0.8 (6–14)	0.5–0.8	0.997	Great Plains, США [6]
CIMEL-GPS	82	1.0	1.6	0.92	10 станций, Канада [7]
CIMEL-модель	271	–1.57	3.38	0.82	
PFR фотометр – GPS		от –0.8 до 1.9	0.5–2.0		Швейцария, 3 станции [8]
CIMEL-GPS	1778	0.0	0.94 (6.8)	0.981	Haute-Provence, Франция [9]
CIMEL-FTIR	677	–1.13 (–25.4)	0.74 (12.7)	0.986	Izaña, Испания, 2370 м над у.м. [10]
CIMEL-MFRSR	17951	3.73 (62)	2.68 (17.5)	0.964	
CIMEL-GPS	1464	0.42 (9.5)	0.96 (34)	0.845	
CIMEL-р/з	875	1.23 (24)	1.34 (23)	0.953	
CIMEL-GPS	9452	–0.16	0.96	0.993	Бельгия, 27 пунктов измерений [11]
CIMEL – МКВ		–0.2			
МКВ-CIMEL	5424–41490	0.7–2.6 (6–9)	0.9–2.7 (6–10)	0.927–0.986	3 станции в США [12]
GPS-CIMEL	4404–19585	0.6–1.1 (2–8)	0.7–3.0 (7–15)	0.912–0.982	
р/з-CIMEL	161–3789	от –0.4 до 0.9 (от –0.8 до 4.8)	0.7–2.1 (4.5–7.5)	0.923–0.984	
CIMEL-GPS	890	0.0	0.93	0.98	Jülich, Германия [24]
CIMEL-МКВ	871	–0.32	0.91 мм	0.99	
CIMEL-р/з	72	–0.42	1.0 мм	0.98	
CIMEL-р/з		–2.62 (–19)	1.76 (12)		Барселона, Испания [25]
CIMEL-МКВ	3569	–1.5	1.1	0.996	Настоящая работа
CIMEL-FTIR	1094	–1.1	0.94	0.99	
CIMEL-р/з	135	–0.52	2.6	0.94	

Примечания. (*N* – число сравнений, *R* – коэффициент корреляции, р/з – радиозондовые измерения, FTIR – ИК-измерения).

метром CIMEL оказались относительно малые систематические отличия (~–4% и –0.5 мм) и большие среднеквадратические рассогласования (~19% и 2.6 мм). Такие же примерно значения были и у стандартных отклонений. Коэффициент корреляции между двумя типами измерениями составил  $0.944 \pm 0.005$ .

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнения измерений ОСВП фотометрами CIMEL проводились с различными методами измерений и различными приборами: радиорефракционным GPS-методом, МКВ радиометрами, ИК Фурье-спектрометрами высококого разрешения, радиозондами, другими фотометрами (см., например, работы [5–12], а также в монографию [13]). Сравнения проводились от полярных широт до тропиков включительно на уровне моря

и на высотах до ~2300 м, в разные сезоны. Систематические рассогласования в сравнениях наблюдались от нулевых до 3.73 мм, стандартные отклонения – от 0.5 мм до 3.0 мм. В относительных величинах разброс в расхождениях между измерениями ОСВП фотометрами CIMEL и другими приборами значительно больше. Максимальные расхождения наблюдались для тропической станции Izaña, Канарские острова (до ~60%), находящейся на высоте ~2300 м, в силу относительной малости измеряемых величин ОСВП.

В табл. 3 приведены примеры различных сопоставлений измерений ОСВП в последние годы. В этих сравнениях были получены разнообразные статистические характеристики рассогласований, зависящие от многих факторов (места измерений, сезона, высоты измерений, величин ОСВП, временной и пространственной согласованности и т.д.). Так, например, полное отсутствие система-

тических отличий отмечается в работе [9] при сравнениях измерений CIMEL с данными измерений радиорефракционного метода GPS. С другой стороны, сравнения измерений CIMEL с измерениями GPS в Локарно, Швейцария показали наличие систематических отличий в 1.9 мм [8]. Сравнения данных CIMEL с измерениями фотометром MFRSR в обсерватории Izaña обнаружили систематические отличия в 3.73 мм [10]. Различные систематические отличия измерений CIMEL от МКВ измерений (от -3 мм до 5 мм) в ряде пунктов наблюдений были зарегистрированы в работе [11]. В работе [12] отмечается наличие рассогласований измерений МКВ и фотометром CIMEL в различных пунктах наблюдений от 1.7 до 2.6 мм. В большинстве приведенных сравнений CIMEL давал заниженные результаты ОСВП по сравнению с данными других приборов.

В различных работах приводятся и разные значения для среднеквадратичных рассогласований и стандартных отклонений. Так, в сравнениях в Швейцарии с GPS измерениями стандартные отклонения составляли 0.5–2.0 мм для различных пунктов наблюдений [8]. Довольно высокие стандартные отклонения были обнаружены между измерениями CIMEL и фотометром MFRSR в обсерватории Izaña [10] и при сравнении CIMEL с данными GPS в тропическом пункте наблюдений Nauru [12].

Исходя из приведенного краткого обзора видно, что рассогласования, полученные при измерениях в Петергофе, близки к результатам в ряде других пунктов наблюдений. Так, CIMEL в Петергофе заметно занижает значения ОСВП, а стандартные отклонения для различных типов сравнений относительно невелики. Это говорит о том, что уточнение калибровки прибора (как это предусмотрено в сети AERONET) и коррекция в методике интерпретации измерений CIMEL (для исключения систематической компоненты ошибки) позволят получить погрешности измерений ОСВП в Петергофе в пределах 5–10%.

Причинами обнаруженных в настоящее время расхождений измерений ОСВП в Петергофе могут быть погрешности калибровки фотометра CIMEL, временная нестабильность его характеристик, несовершенство методики интерпретации измерений и т.д. Нами был проведен предварительный анализ ряда возможных причин. Так, проведенные лабораторные измерения спектрального пропускания интерференционных фильтров прибора показали, что они совпадают с паспортными данными в пределах 1%. Таким образом, старение фильтров прибора за время наблюдений не наблюдалось. Не обнаружена также связь расхождений измерений ОСВП с величиной воздушной массы в направлении на Солнце, что свидетельствует об отсутствии заметных погрешностей

калибровки прибора. Кроме того, известно, что используемый в приборе кремниевый фотодиод имеет высокую временную стабильность характеристик. Таким образом, можно сделать предварительный вывод, что основной причиной наблюдаемых систематических отличий измерений ОСВП прибором CIMEL от независимых данных является несовершенство методики интерпретации измерений. Это могут быть как погрешности в задании интенсивности полосы поглощения водяного пара, так и приближенный характер параметризации функции пропускания в канале 940 нм. Дальнейший анализ возможных причин и коррекция методики интерпретации будут рассмотрены в последующих исследованиях и публикациях.

## 5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В течение периода более года (13.03.2013 г.–31.05.2014 г.) в СПбГУ (Петергоф, 59.88° N, 29.82° E) были проведены синхронные измерения общего содержания водяного пара с помощью трех дистанционных методов и приборов: фотометра CIMEL CE 318N-EDPS9, МКВ радиометра RPG-HATPRO и ИК Фурье-спектрометра Bruker IFS-125HR. Следует подчеркнуть, что при интерпретации данных измерений прибора CIMEL использовалась калибровка прибора фирмой изготовителем. Фотометр CIMEL и Фурье-спектрометр измеряли поглощения прямого солнечного излучения в ближней и средней ИК-области соответственно. МКВ радиометр получал информацию об ОСВП из измерений нисходящего теплового МКВ излучения атмосферы. Сравнения трех приборов с учетом взаимного сравнения радиометра RPG-HATPRO и Фурье-спектрометра Bruker IFS-125HR и их высокой точности позволили оценить погрешности измерений ОСВП фотометром CIMEL CE 318N-EDPS9 для условий Санкт-Петербурга.

1. Прибор CIMEL занижает ОСВП по сравнению с МКВ измерениями. Это занижение особенно значительно при малых величинах ОСВП (менее 4 мм) и достигает ~18%. С ростом ОСВП относительные рассогласования, как правило, уменьшаются. Минимальное среднее рассогласование составляет ~10% для поддиапазона величин ОСВП 10–20 мм. Абсолютные значения рассогласований находятся в диапазоне от 0.51 мм до 2.72 мм и растут с ростом значений ОСВП. Для всего ансамбля сопоставлений средние рассогласования составляют ~10.9% и 1.56 мм.

2. Измерения CIMEL также занижают ОСВП по сравнению с ИК-методом. Это занижение в относительных величинах составляет ~10%, а в абсолютных – близко к 1 мм. Расхождения между измерениями CIMEL и двумя другими приборами очень близки, что с учетом взаимной калиб-

ровки этих приборов говорит о необходимости дополнительной калибровки прибора CIMEL и, возможно, коррекции методик и алгоритмов интерпретации измерений фотометра CIMEL для условий Санкт-Петербурга.

3. Сравнение данных измерений ОСВП фотометром CIMEL с результатами радиозондирования на станции Воейково показало еще раз (см., например, [21, 23, 24]), что на расстоянии около 50 км часто наблюдается существенная горизонтальная неоднородность поля влажности, что может быть, в частности, вызвано близостью к станции наблюдений в Петергофе акватории Финского залива. Поэтому такие сравнения часто не могут служить критериями качества измерений прибора CIMEL.

4. Малые значения стандартных отклонений между измерения ОСВП различными приборами гарантируют получение погрешности измерений CIMEL в 5–10% после дополнительной калибровки прибора и коррекции методики интерпретации измерений.

Экспериментальная часть исследований проводилась на аппаратуре РЦ “Геомодель” СПбГУ и финансировалась грантом РФФИ № 15-05-07524, первичная и вторичная обработка и анализ данных выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда № 14-17-00096.

Обсуждения и подготовка статьи выполнены в рамках НИР СПбГУ № 11.42.1380.2015.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт AERONET [Электронный ресурс] <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
2. Поддубный В.А., Сакерин С.М., Лужецкая А.П. и др. Исследования атмосферного аэрозоля на Среднем Урале методами спектральной солнечной фотометрии // Вестник УрО РАН. 2013. Т. 2. № 44. С. 37–53.
3. Бадинов И.Я., Андреев С.Д., Липатов В.Б. Некоторые результаты наземных спектрометрических исследований влагосодержания толщи атмосферы // Проблемы физики атмосферы. 1966. № 4. С. 54–64.
4. Кабанов Д.М., Сакерин С.М. Результаты исследования общего влагосодержания атмосферы методом оптической гигрометрии. Ч. 1. Анализ методики и результатов калибровки // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 6. С. 852–860.
5. Alexandrov M.D., Schmid B., Turner D.D. et al. Columnar water vapour retrievals from multifilter rotating shadowband radiometer data // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. № D2. P. 1–28. D02306.
6. Schmid B., Michalsky J.J., Slater D.W. et al. Comparison of columnar water-vapor measurements from solar transmittance methods // Appl. Optics. 2001. V. 40. № 12. P. 1886–1896.
7. Bokoye A.I., Royer A., O'Neill N.T. et al. Multisensor analysis of integrated atmospheric water vapor over Canada and Alaska // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № D15. P. 4480.
8. Morland J., Deuber B., Feist D.G. et al. The START-WAVE atmospheric water database // Atmos. Chem. Phys. 2006. V. 6. № 8. P. 2039–2056.
9. Bock O., Bosser P., Bourcy T. et al. Accuracy assessment of water vapour measurements from in situ and remote sensing techniques during the DEMEVAP 2011 campaign at OHP // Atmos. Meas. Tech. 2013. V. 6. № 10. P. 2777–2802.
10. Schneider M., Romero P.M., Hase F. et al. Continuous quality assessment of atmospheric water vapour measurement techniques: FTIR, Cimel, MFRSR, GPS, and Vaisala RS92 // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3. № 2. P. 323–338.
11. Van Malderen R., Brenot H., Pottiaux E. et al. A multi-site intercomparison of integrated water vapour observations for climate change analysis // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7. № 8. P. 2487–2512.
12. Pérez-Ramírez E.D., Whiteman D.N., Smirnov A. et al. Valuation of AERONET precipitable water vapor versus microwave radiometry, GPS, and radiosondes at ARM sites // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. № 15. P. 9596–9613.
13. Monitoring Atmospheric Water Vapour Ground-Based Remote Sensing and In-situ Methods. Ed. by N. Kämpfer. Series: ISSI Scientific Report Series. V. 10. № VIII. New York: Springer-Verlag, 2013. 328 p.
14. Smirnov A., Holben B.N., Lyapustin A. et al. AERONET processing algorithms refinement. 2004 AERONET Workshop. El Arenosillo, Spain. 10–14 May. Huelva: AERONET. 2004. URL: [http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new\\_web/spain2004/presentations/Smir-nov\\_Algorithm.ppt](http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/spain2004/presentations/Smir-nov_Algorithm.ppt)
15. Romero P.M., Cuevas E., Ramos R. et al. Programa de vapor de agua en columna del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña: Análisis e Intercomparación de diferentes Técnicas de Medida – NTD CIAI-1. Izaña: Agencia Estatal de Meteorología, 2009. 64 p.
16. Rose Th., Czekala H. Accurate Atmospheric Profiling with the RPG-HATPRO Humidity – and Temperature Profiler. Meckenheim: RPG, 2005. 20 p.
17. Зайцев Н.А., Тимофеев Ю.М., Косцов В.С. Сравнение радиозондовых и наземных дистанционных микроволновых измерений профилей температуры в тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 5. С. 392–398.
18. Косцов В.С. Восстановление параметров облачной атмосферы по данным радиометра RPG-HATPRO // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 179–190.
19. Поберовский А.В. Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 1. С. 56–58.
20. 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. V. 87. № 1. P. 25–52.

21. Семенов А.О., Виrolainen 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.
22. Фридзон М.Б., Ермошенко Ю.М. Радиозондирование атмосферы // Мир измерений. 2009. № 7. URL: <http://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=30717>
23. Vogelmann H., Sussmann R., Trickl T. et al. Spatio-temporal variability of water vapor investigated by lidar and FTIR vertical soundings above Mt. Zugspitze // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. № 6. P. 3135–3148.
24. Steinke S., Eikenberg S., Löhnert U. et al. Assessment of small-scale integrated water vapour variability during HOPE // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. № 5. P. 2675–2692.
25. Campmany E., Bech J., Rodríguez-Marcos J. et al. A comparison of total precipitable water measurements from radiosonde and sunphotometers // Atmos. Res. 2010. V. 97. P. 385–392.

## Error Analysis of Integrated Water Vapor Measured by CIMEL Photometer

I. A. Berezin<sup>a</sup>, Yu. M. Timofeyev<sup>a</sup>, Ya. A. Virolainen<sup>a,\*</sup>, I. S. Frantsuzova<sup>a</sup>, K. A. Volkova<sup>a</sup>,  
A. V. Poberovsky<sup>a</sup>, B. N. Holben<sup>b</sup>, A. Smirnov<sup>b</sup>, and I. Slutsker<sup>b</sup>

<sup>a</sup>St. Petersburg State University, St. Petersburg, Universitetskaya nab. 7/9, 199034 Russia

<sup>b</sup>NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA

\*e-mail: yana.virolainen@spbu.ru

Received June 5, 2015; in final form, November 27, 2015

**Abstract**—Water vapor plays a key role in weather and climate forming, which leads to the need for continuous monitoring of its content in different parts of the Earth. Intercomparison and validation of different methods for integrated water vapor (IWV) measurements are essential for determining the real accuracies of these methods. CIMEL photometers measure IWV at hundreds of ground-based stations of the AERONET network. We analyze simultaneous IWV measurements performed by a CIMEL photometer, an RPG-HATPRO MW radiometer, and a FTIR Bruker 125-HR spectrometer at the Peterhof station of St. Petersburg State University. We show that the CIMEL photometer calibrated by the manufacturer significantly underestimates the IWV obtained by other devices. We may conclude from this intercomparison that it is necessary to perform an additional calibration of the CIMEL photometer, as well as a possible correction of the interpretation technique for CIMEL measurements at the Peterhof site.

**Keywords:** Integrated water vapor, AERONET, CIMEL, MW radiometer, FTIR spectrometer