

УДК 551.510.41

СРАВНЕНИЯ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКОГО ИНФРАКРАСНОГО НАЗЕМНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В АТМОСФЕРЕ

Д. В. Ионов^{1*}, В. В. Калинин², Ю. М. Тимофеев¹, Н. А. Зайцев¹,
Я. А. Виролайнен¹, В. С. Косцов¹, А. В. Поберовский¹

¹ Санкт-Петербургский госуниверситет, г. Санкт-Петербург;

² Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

Радиофизические методы зондирования атмосферы в силу своей всепогодности позволяют, в частности, выполнять непрерывные наблюдения вариаций атмосферного содержания водяного пара — важнейшего естественного парникового газа. На измерительной станции Санкт-Петербургского госуниверситета в г. Петергоф (59,88° с. ш., 29,83° в. д.) функционирует ряд наземных приборов, осуществляющих определение общего содержания водяного пара (ОСВП) в атмосфере. В течение года, с сентября 2014 по сентябрь 2015 года, были проведены синхронные измерения ОСВП двумя радиофизическими методами — микроволновым и радиорефракционным, а также оптическим инфракрасным методом. Сравнения показали, что в среднем систематические и случайные рассогласования между тремя методами составляют $0,3 \div 0,5 \text{ кг/м}^2$ ($3 \div 7 \%$) и $0,4 \div 0,6 \text{ кг/м}^2$ ($8 \div 11 \%$) соответственно относительно инфракрасного метода. Наибольшие относительные расхождения результатов различных типов измерений (до 20 %) наблюдаются при очень малых значениях ОСВП (менее 5 кг/м^2). Эмпирические оценки случайных погрешностей методов составили 0,5; 0,3 и $0,3 \text{ кг/м}^2$ для радиорефракционного, микроволнового и инфракрасного методов соответственно. Результаты измерения ОСВП радиорефракционным и микроволновым методами хорошо согласуются между собой и превышают результаты измерений оптическим методом. Полученные расхождения в оценках ОСВП малы по сравнению с опубликованными ранее результатами аналогичных сопоставлений, что обусловлено, в частности, высоким пространственно-временным согласованием различных измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Водяной пар является важнейшим естественным парниковым газом в атмосфере Земли. Его вклад в парниковый эффект очень изменчив и может достигать 60 % в условиях безоблачной атмосферы [1]. Водяной пар играет также важную роль в круговороте воды в природе (гидрологическом цикле), в атмосферной химии, формировании озонового слоя, переносе энергии в форме скрытой теплоты и так далее [2]. Наблюдаемое потепление должно привести к росту содержания водяного пара и ещё более усилить дальнейшие изменения климата [3]. В последние годы появляются публикации, свидетельствующие о наличии долговременных трендов влагосодержания на разных уровнях атмосферы (см., например, работы [4–8]). Важная роль водяного пара стимулировала создание и использование целого ряда локальных и дистанционных методов его измерений. В последнее время всё более широкое применение находит радиорефракционный метод определения общего содержания водяного пара (ОСВП) на основе измерений радиосигналов Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС; см., например, [9]). При этом актуальной проблемой является сопоставление результатов различных измерений для осуществления взаимных калибровок и определения погрешностей используемых методов и приборов.

В данной работе проведены сравнения трёх наземных методов измерений ОСВП — двух радиофизических методов (радиорефракционного и связанного с регистрацией теплового излучения атмосферы) и оптического (инфракрасного) метода, основанного на измерениях прямого солнечного излучения.

* d.ionov@spbu.ru

1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В работе анализируются результаты сопоставления наземных измерений значений ОСВП, полученных с помощью инфракрасного спектроскопического метода (регистрируется прямое солнечное излучение), микроволнового метода (регистрируется собственное тепловое излучение атмосферы) и радиорефракционного метода (регистрируются радиосигналы ГНСС). Одновременные измерения ОСВП всеми тремя рассматриваемыми методами осуществлялись в районе физического факультета СПбГУ (г. Петергоф, $59,88^\circ$ с. ш., $29,83^\circ$ в. д.) в период с сентября 2014 по сентябрь 2015 года.

Измерения спектров прямого солнечного инфракрасного излучения с высоким спектральным разрешением выполняются в СПбГУ с помощью наземного спектрального комплекса на базе фурье-спектрометра IFS-125HR компании «Bruker» [10]. Наблюдения проводятся в условиях ясного неба и при достаточно больших разрывах облачности. Для определения влагосодержания используются данные инфракрасных измерений в 6-ти спектральных интервалах: $1110,0 \div 1113,0$ см $^{-1}$; $1117,3 \div 1117,9$ см $^{-1}$; $1120,1 \div 1122,0$ см $^{-1}$; $1196,0 \div 1200,4$ см $^{-1}$; $1220,5 \div 1221,5$ см $^{-1}$ и $1251,75 \div 1253,00$ см $^{-1}$. Их интерпретация выполняется с помощью программного комплекса PROFFIT [11]. Методика измерений подробно описана в работе [12]. За рассматриваемый период сопоставлений по всем имеющимся результатам спектральных измерений солнечного излучения в окне прозрачности $8 \div 9$ мкм (302 спектра) были получены данные по общему влагосодержанию в районе г. Санкт-Петербург для 50 дней. Время регистрации единичного спектра составляет около 12 мин; число спектров, получаемых в течение дня, — от 1 до 12 (в среднем 6). Измерения выполнялись при различной высоте Солнца — от 5° до 53° (в среднем 26°). Наибольшее число инфракрасных измерений приходится на сентябрь (63 спектра в течение 11 дней), наименьшее — на декабрь (4 спектра в течение одного дня). Для всего ансамбля из 302-х измерений средняя полная погрешность измерения ОСВП по расчётам матриц ошибок составляет $0,31$ кг/м 2 (3,6 %), при этом её случайная компонента равна $0,11$ кг/м 2 (1,3 %), а систематическая $0,29$ кг/м 2 (3,3 %). Расчёты также показывают, что абсолютные погрешности инфракрасных измерений растут с увеличением ОСВП, изменяясь от $0,1$ кг/м 2 (при ОСВП менее 5 кг/м 2) до $0,7$ кг/м 2 (при ОСВП более 20 кг/м 2).

Микроволновые измерения ОСВП осуществляются в СПбГУ с помощью радиометра RPG-NATPRO (Radiometer Physics GmbH — Humidity And Temperature PROfiler) немецкой компании «Radiometer Physics GmbH» [13], который имеет 7 каналов в области полосы поглощения кислорода и 7 каналов в области линии поглощения водяного пара около $1,35$ см. Радиометр непрерывно и круглосуточно регистрирует интенсивность нисходящего микроволнового излучения в зенитном направлении. Значение ОСВП определяется прибором каждые 2 секунды с абсолютной погрешностью $\pm 0,3$ кг/м 2 и случайной погрешностью менее $0,05$ кг/м 2 [13]. Наши оценки флуктуаций ОСВП, регистрируемые прибором при постоянных значениях ОСВП в течение 5 мин, показывают, что случайные погрешности измерений в зависимости от величины ОСВП находятся в диапазоне $0,06 \div 0,27$ кг/м 2 . При низком (менее 5 кг/м 2) ОСВП относительные случайные погрешности микроволновых измерений составляют около 2 %, а полные погрешности могут достигать примерно $10 \div 15$ %. Это обусловлено слабым поглощением в используемой линии водяного пара. При среднем (около 15 кг/м 2) и высоком (более 20 кг/м 2) значении ОСВП случайная погрешность метода составляет менее 1 %. Исходя из приведённых оценок, этот метод должен иметь некоторые преимущества по сравнению с инфракрасным методом при величине ОСВП более 10 кг/м 2 ; при низком ОСВП преимуществом обладает инфракрасный метод.

Для радиорефракционных измерений ОСВП в СПбГУ используется двухчастотный ГНСС-приёмник ProPak-V3 канадской фирмы «NovAtel», приёмная антенна которого установлена в непо-

средственной близости от микроволнового радиометра. Поскольку индекс рефракции дециметровых радиоволн (с частотами около 1,2 и 1,5 ГГц) в атмосфере зависит, в частности, от содержания водяного пара, радиосигналы, транслируемые спутниками ГНСС, содержат информацию о влагосодержании. Специальные методики позволяют определять ОСВП из непрерывного ряда фазовых измерений радиосигналов ГНСС наземными стационарными приёмниками (см., например, [14]). В данной работе для интерпретации радиосигналов ГНСС используется приложение TropoGNSS, в котором реализован алгоритм, детально описанный в [15]. В качестве параметра, несущего информацию о влагосодержании, рассматривается так называемая зенитная тропосферная задержка (zenith tropospheric delay, ZTD), показывающая, насколько длина фазового пути радиосигнала от спутника до приёмника в вертикальном (зенитном) направлении больше, чем геометрическое расстояние между ними. Эта задержка определяется из уравнений фазовых измерений, составленных для всех синхронно наблюдаемых навигационных спутников. Комбинации фазовых измерений, выполненных для различных частот, спутников и моментов времени, позволяют исключить из общей атмосферной задержки радиосигнала ионосферную составляющую, а также ошибки часов приёмника и фазовые неоднозначности измерений. Вычисление геометрических расстояний между спутниками и приёмником осуществляется с привлечением информации об эфемеридах и ошибках часов спутников, получаемой из данных Всемирной службы глобальных навигационных спутниковых систем (International GNSS Service, IGS [16]). Полученная система уравнений решается относительно зенитной тропосферной задержки с использованием фильтрации Калмана [17]. Полная тропосферная задержка рассматривается как сумма гидростатической и «влажной» компонент.

Гидростатическая часть зенитной тропосферной задержки (zenith hydrostatic delay, ZHD) связана с плотностью влажного воздуха, имеющего вертикальное гидростатическое распределение, и может быть выражена через приземное давление в точке приёмника. Оставшаяся часть, или «влажная» тропосферная задержка (zenith wet delay, ZWD), обусловлена исключительно присутствием водяного пара. Поскольку радиотрассы спутниковых сигналов наклонны, полученные тропосферные задержки преобразуются в вертикальные (зенитные) с использованием так называемых картирующих функций (mapping functions; в TropoGNSS используется функция Нила в комбинации с моделью MOPS [18]). Искомое значение ОСВП извлекается из полученной оценки «влажной» тропосферной задержки с использованием средневзвешенной по водяному пару температуры атмосферного столба, рассчитываемой по приземной температуре. В качестве данных о приземном давлении (оценка зенитной гидростатической задержки) и приземной температуры (расчёт ОСВП из «влажной» тропосферной задержки) используются результаты локальных измерений метеостанции, установленной в точке расположения приёмной антенны ГНСС. Регистрация навигационных радиосигналов осуществляется в непрерывном режиме с временным интервалом 5 мин. Абсолютная погрешность определения ОСВП данным методом оценивается в $1,5 \text{ кг/м}^2$ [19]. В рассматриваемом ансамбле данных средняя оценка погрешности измерений ОСВП составила $0,95 \text{ кг/м}^2$, изменяясь примерно от $0,8 \text{ кг/м}^2$ (при ОСВП менее 5 кг/м^2) до $1,1 \text{ кг/м}^2$ (при ОСВП более 20 кг/м^2).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЙ

В силу относительной всепогодности радиофизических методов определения ОСВП, наиболее полный ряд данных одновременных наблюдений был накоплен по измерениям микроволнового излучения (радиометр) и навигационным радиосигналам. Данные, полученные этими двумя методами, представлены на рис. 1; на рис. 1б приведена разность значений ОСВП, полученных с помощью радиометра и ГНСС. Из сопоставления были исключены результаты измерений ра-

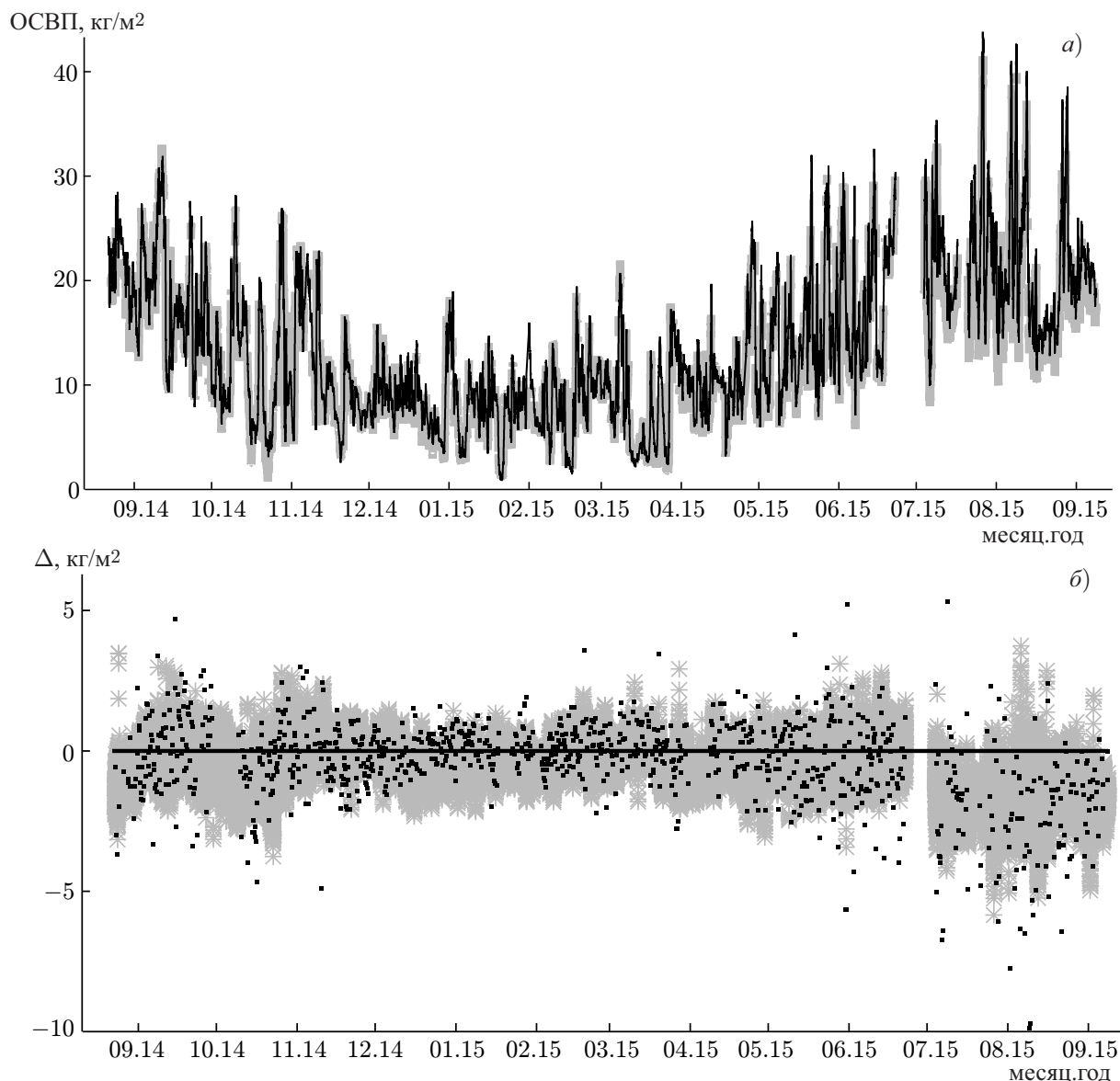


Рис. 1. Величина ОСВП в г. Петергоф по измерениям микроволнового радиометра (серая линия) и анализу радиосигналов ГНСС (чёрная линия) в 2014–2015 годах (а); разность Δ значений ОСВП, полученных с помощью радиометра и ГНСС (серый цвет), ECMWF и ГНСС (чёрные точки) (б)

диометром в условиях дождя, идентифицируемых по данным специального датчика в составе микроволновой аппаратуры (± 15 мин от времени сигнала датчика). Представленные измерения охватывают годовой период (с сентября 2014 года по сентябрь 2015 года), демонстрируя характерный сезонный ход ОСВП — максимальное влагосодержание летом (около 20 кг/м^2 и более) и минимальное зимой (около 10 кг/м^2). Кроме того, в период с июля по сентябрь 2015 года измерения радиометра систематически занижают ОСВП относительно радиорефракционного метода: если с сентября 2014 по июль 2015 года средняя разность значений ОСВП, полученных с помощью радиометра и ГНСС, составляла $-0,2 \pm 1,1 \text{ кг/м}^2$, то с июля по сентябрь 2015 года — уже $-1,6 \pm 0,8 \text{ кг/м}^2$. Предположительно, эта систематическая ошибка в данных радиометра связана с погрешностями плановой калибровки аппаратуры, выполнявшейся 3 июля 2015 года. Дополнительное сравнение измерений радиометра с данными Европейского центра среднесрочных про-

Таблица 1. Оценки расхождений между результатами измерений ОСВП по данным микроволнового радиометра и ГНСС в г. Петергоф в 2014–2015 годах

ОСВП	N	Δ , кг/м ²	Δ , %	R
ОСВП < 5 кг/м ²	7 302	$-0,2 \pm 0,7$	-3 ± 20	0,73
5 кг/м ² < ОСВП < 10 кг/м ²	26 352	$-0,3 \pm 0,5$	-4 ± 8	0,92
10 кг/м ² < ОСВП < 20 кг/м ²	25 557	$-0,2 \pm 0,7$	-2 ± 5	0,98
20 кг/м ² < ОСВП < 25 кг/м ²	4 398	$-0,2 \pm 0,7$	-1 ± 3	0,88
ОСВП > 25 кг/м ²	1 755	$-0,2 \pm 0,7$	-1 ± 3	0,92
Все данные	64 692	$-0,3 \pm 0,6$	-3 ± 9	0,99

гнозов погоды (ECMWF [20]; ОСВП с районе г. Санкт-Петербург каждые 6 часов) подтверждает наличие систематического смещения в результатах микроволновых измерений. В дальнейшем анализе результатов сопоставления рассматривается период наблюдений, предшествующий указанной калибровке радиометра (т. е. до 3 июля 2015 года).

На рис. 2а представлена диаграмма рассеяния для сопоставления данных ГНСС (горизонтальная ось) с результатами микроволновых (вертикальная ось) измерений с сентября 2014 по июль 2015 года, состоящая из 64 692 пар одновременных измерений ОСВП (коэффициенты угла наклона и начального смещения составляют 1,004 и $-0,301$ соответственно). Численные оценки расхождений в виде средней разности Δ значений ОСВП, полученных с помощью радиометра и ГНСС (плюс-минус стандартное отклонение от среднего), и коэффициента корреляции R приведены в табл. 1, как для всего ансамбля сопоставлений, так и для нескольких диапазонов ОСВП ($0 \div 5$; $5 \div 10$; $10 \div 20$; $20 \div 25$ и более 25 кг/м²). Также в табл. 1 приведено число сопоставлений N . В зависимости от выбора диапазона значений средняя разность составляет $0,2 \div 0,3$ кг/м² ($0,6 \div 4,3$ %), а коэффициент корреляции меняется от 0,73 до 0,98 (0,99 для всего ансамбля дан-

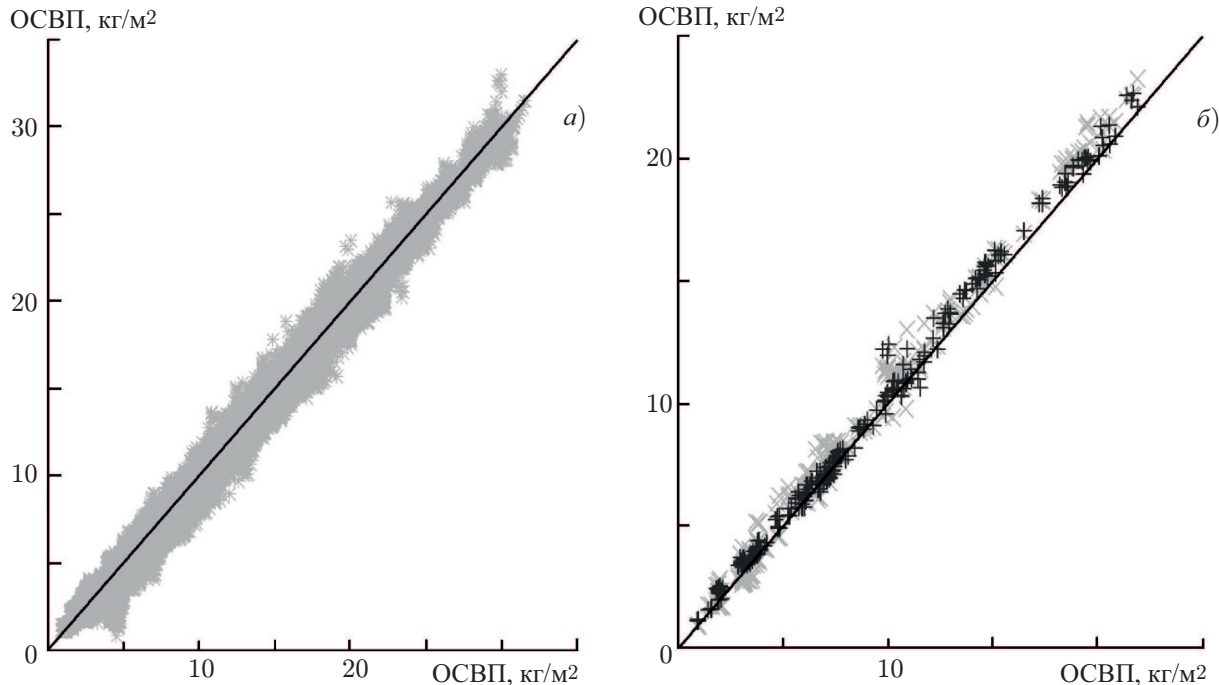


Рис. 2. Диаграммы рассеяния данных об ОСВП по одновременным микроволновым измерениям и радиосигналам ГНСС (а), а также одновременным инфракрасным измерениям (б). Серый цвет на панели б отвечает ГНСС, чёрный — радиометру

Таблица 2. Оценки расхождений между результатами измерений ОСВП по данным микроволнового радиометра, ГНСС и инфракрасными измерениями в г. Петергоф в 2014–2015 годах

	N	Радиометр			ГНСС		
		Δ , кг/м ²	Δ , %	R	Δ , кг/м ²	Δ , %	R
ОСВП < 5 кг/м ²	94	$-0,3 \pm 0,2$	-13 ± 9	0,98	$-0,1 \pm 0,5$	-4 ± 16	0,91
5 кг/м ² < ОСВП < 10 кг/м ²	99	$-0,2 \pm 0,4$	-3 ± 5	0,96	$-0,5 \pm 0,5$	-7 ± 7	0,93
10 кг/м ² < ОСВП < 20 кг/м ²	85	$-0,6 \pm 0,5$	-4 ± 4	0,99	$-0,8 \pm 0,6$	-5 ± 5	0,99
ОСВП > 20 кг/м ²	11	$-0,6 \pm 0,5$	-3 ± 2	0,87	$-0,9 \pm 0,4$	-4 ± 2	0,91
Все данные	289	$-0,4 \pm 0,4$	-7 ± 8	1,00	$-0,5 \pm 0,6$	-6 ± 11	1,00

ных). В целом, результаты измерений радиометра систематически ниже данных ГНСС (в среднем на 0,3 кг/м², или 3 %). Большое стандартное отклонение при наиболее низких величинах ОСВП (20,3 %) связано с малым поглощением в линии водяного пара при 1,35 см и ростом относительной погрешности микроволнового метода.

Данные радиорефракционных и микроволновых измерений ОСВП сравнивались также с результатами измерений инфракрасным спектрометром. Соответствующая диаграмма рассеяния представлена на рис. 2б (коэффициенты угла наклона и начального смещения составляют 1,024 и 0,173 для микроволнового метода и 1,053 и 0,028 для ГНСС соответственно, горизонтальная ось соответствует инфракрасному методу, вертикальная — радиорефракционному и микроволновому). Поскольку инфракрасные измерения выполняются преимущественно в ясную погоду, число пар сопоставлений относительно невелико — всего 289. В табл. 2 приведены численные оценки расхождений Δ при сопоставлении данных радиометра и ГНСС с результатами инфракрасных измерений по аналогии с табл. 1 (для тех же диапазонов ОСВП). Оба типа измерений, микроволновый (радиометр) и радиорефракционный (ГНСС), в среднем демонстрируют схожий уровень согласия с данными инфракрасных измерений: средняя разность составляет $0,4 \div 0,5$ кг/м² ($6 \div 7$ %), коэффициент корреляции 1,00. Данные радиометра и ГНСС систематически выше результатов инфракрасных измерений, при этом для данных ГНСС это превышение растёт с увеличением ОСВП. При малых значениях ОСВП наблюдаются большие относительные систематические отличия между инфракрасными и микроволновыми измерениями (13,3 %) и большие относительные стандартные отклонения (16,4 %) при сравнении инфракрасных и радиорефракционных измерений.

Интересно также сравнить, как различные системы измерений ОСВП регистрируют быстрые вариации влагосодержания внутрисуточного масштаба. Примеры таких сопоставлений представлены на рис. 3, где изображены вариации ОСВП для нескольких дней, когда погодные условия позволили выполнить относительно продолжительную серию инфракрасных измерений, отдельно для периодов стабильного и быстроменяющегося влагосодержания. Сравнения показывают, что результаты микроволновых и радиорефракционных измерений в целом согласованно воспроизводят вариации ОСВП внутри 6-часовых промежутков данных ECMWF. В среднем наилучшее согласие достигается между данными инфракрасных и радиорефракционных измерений; результаты измерений радиометра в отдельные периоды систематически отличаются от данных ГНСС. Стабильный уровень влагосодержания наблюдается преимущественно в зимнее время, при низких значениях ОСВП (менее 5 кг/м²). При влагосодержании ниже 3 кг/м² результаты всех измерений заметно отличаются от данных ECMWF (последние систематически завышают величину ОСВП на $1 \div 2$ кг/м², например 21 января и 17 февраля 2015 года). В целом, с учётом приведённых оценок погрешностей, согласие трёх сравниваемых типов измерений можно считать хорошим.

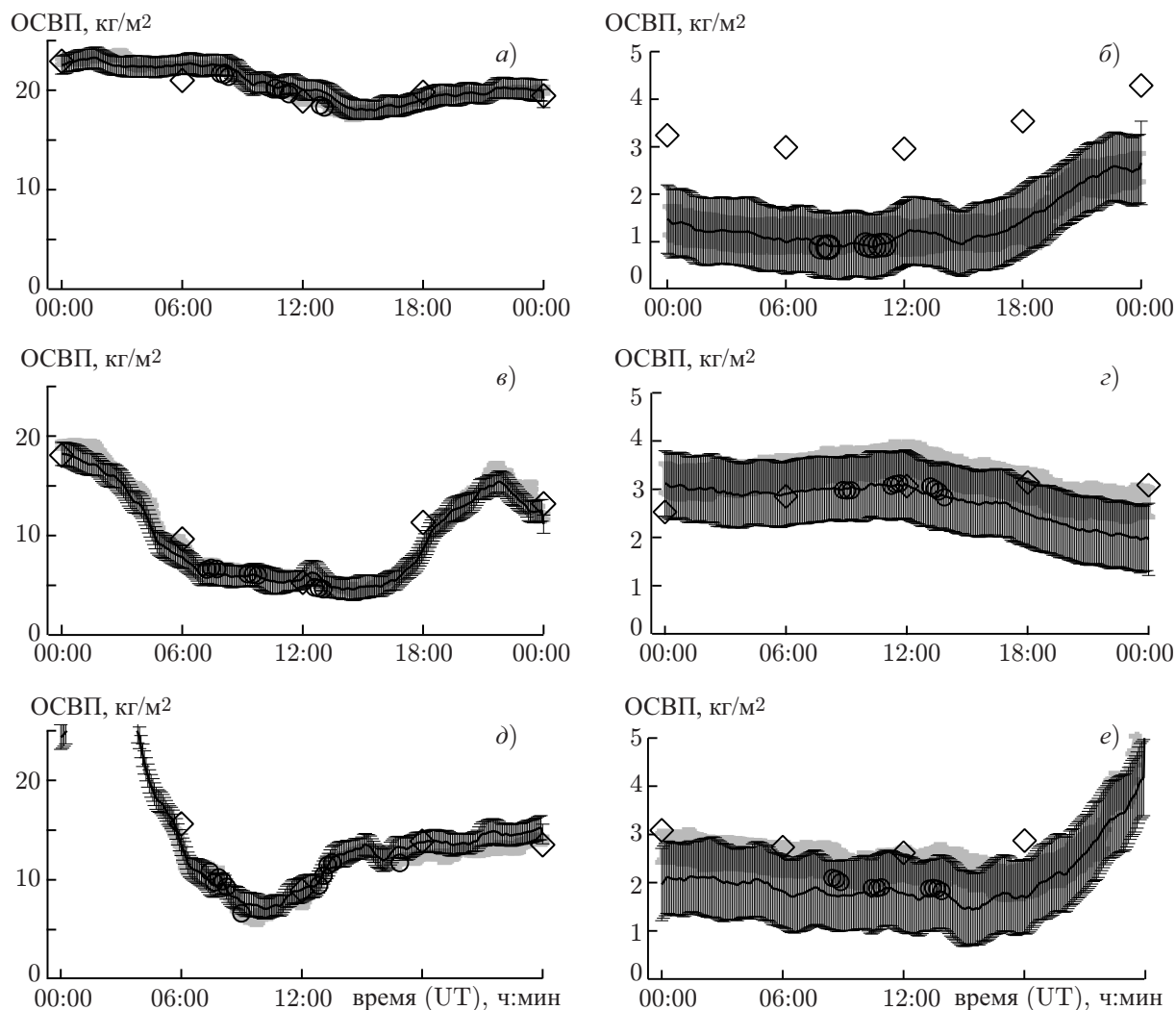


Рис. 3. Суточные вариации ОСВП по данным измерений микроволнового радиометра, радиосигналов ГНСС и инфракрасного спектрометра в г. Петергоф, а также данным ECMWF в районе г. Санкт-Петербург. Слева представлены дни с большой изменчивостью ОСВП (*a* — 5 сентября, *б* — 29 октября 2014 года, *д* — 7 июля 2015 года), а справа — с относительно стабильным влажностным содержанием в период инфракрасных измерений (*б* — 21 января, *г* — 16 февраля, *е* — 17 февраля 2015 года). Серые линии соответствуют данным радиометра, чёрные — ГНСС, символы $\circ$ — инфракрасному методу, $\diamond$ — ECMWF. Кривые сопровождаются оценками погрешности микроволнового и ГНСС измерений (для оценки инфракрасных измерений погрешности не приводятся, т. к. составляют менее $0,1 \text{ кг/м}^2$)

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставлению различных методов измерений ОСВП посвящено большое число работ (см., например, монографию [21]). Сравнения микроволновых и радиорефракционных методов были проведены в [22–24]. В этих работах получены оценки систематических расхождений сравниваемых измерений в диапазоне около $0,0 \div 0,9 \text{ кг/м}^2$ (до 13 %) и стандартных отклонений около $1,0 \div 2,7 \text{ кг/м}^2$ (до 29 %). Сравнения инфракрасных и радиорефракционных методов обсуждаются в работах [22, 25]. В них приведены систематические отклонения в диапазоне около $0,1 \div 0,6 \text{ кг/м}^2$ и стандартные отклонения около $0,7 \div 1,0 \text{ кг/м}^2$; при этом инфракрасные измерения давали мень-

шие значения ОСВП. Подробный анализ погрешностей радиорефракционного (ГНСС) метода дан в работе [26]. В ней приведены полные погрешности в диапазоне $0,6 \div 0,7$ кг/м² (около 2 %) для относительно высоких значений ОСВП ($23 \div 33$ кг/м²).

Сравнения микроволнового и инфракрасного методов, проведённые ранее в СПбГУ [27], показали, что микроволновые измерения дают большие значения ОСВП, чем инфракрасные измерения, причём это превышение достигает 6,2 % при малых ОСВП (сухой сезон) и составляет 1,8 % при больших значениях ОСВП (влажный сезон). В среднем микроволновые данные превышают инфракрасные на 2,8 % ($0,29$ кг/м²), стандартные отклонения средних составляют 4,1 % ($0,42$ кг/м²). Аналогичное превышение микроволновых данных над инфракрасными наблюдается и в настоящих исследованиях. Оно в среднем составляет $0,4$ кг/м² (6,6 %) и особенно велико при малом ОСВП.

Почти все приведённые в других работах рассогласования заметно больше отклонений, полученных в данной работе. Наличие одновременных измерений трёх разных приборов в предположении пространственной однородности атмосферы вблизи пункта измерений и некоррелированности случайных погрешностей измерений различными методами и приборами позволяет оценить случайные компоненты погрешностей измерений. Следуя подходу, предложенному в работе [26], запишем систему уравнений

$$S_{\text{ИК-МКВ}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{ИК}}^2 + \varepsilon_{\text{МКВ}}^2}, \quad (1)$$

$$S_{\text{ГНСС-МКВ}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{ГНСС}}^2 + \varepsilon_{\text{МКВ}}^2}, \quad (2)$$

$$S_{\text{ИК-ГНСС}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{ИК}}^2 + \varepsilon_{\text{ГНСС}}^2}, \quad (3)$$

где S — стандартное отклонение среднего расхождения между методами, ε — оценка случайной погрешности одного из методов, индексы ИК, МКВ и ГНСС соответствуют инфракрасному, микроволновому и радиорефракционному (ГНСС) методам. Из системы (1)–(3) получим формулы расчёта случайных погрешностей:

$$\varepsilon_{\text{ИК}} = \sqrt{\frac{1}{2} (S_{\text{ИК-МКВ}}^2 + S_{\text{ИК-ГНСС}}^2 - S_{\text{ГНСС-МКВ}}^2)}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\text{МКВ}} = \sqrt{\frac{1}{2} (S_{\text{ИК-МКВ}}^2 + S_{\text{ГНСС-МКВ}}^2 - S_{\text{ИК-ГНСС}}^2)}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\text{ГНСС}} = \sqrt{\frac{1}{2} (S_{\text{ГНСС-МКВ}}^2 + S_{\text{ИК-ГНСС}}^2 - S_{\text{ИК-МКВ}}^2)}. \quad (6)$$

Рассчитанные величины $\varepsilon_{\text{ИК}}$, $\varepsilon_{\text{МКВ}}$ и $\varepsilon_{\text{ГНСС}}$ составили 0,29; 0,26 и 0,52 кг/м² соответственно. Эти оценки свидетельствуют об одинаковом уровне случайных погрешностей инфракрасного и микроволнового методов; случайная погрешность метода ГНСС заметно выше (почти вдвое).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые в течение года в районе г. Санкт-Петербург (г. Петергоф) сравнения синхронных наземных измерений общего содержания водяного пара инфракрасным, микроволновым и радиорефракционным (ГНСС) методами показали следующее.

1) В среднем систематические и случайные рассогласования между тремя методами составляют $0,3 \div 0,5$ кг/м² ($3 \div 7$ %) и $0,4 \div 0,6$ кг/м² ($8 \div 11$ %) соответственно относительно инфракрасного метода. Наибольшие относительные расхождения измерений (до 20 %) наблюдаются при очень

малых значениях ОСВП. Эмпирические оценки случайных погрешностей трёх методов дали величины 0,3; 0,3 и 0,5 кг/м² для инфракрасного, микроволнового и радиорефракционного методов соответственно.

2) Результаты измерений ОСВП радиорефракционным и микроволновым методами хорошо согласуются между собой и превышают результаты измерений инфракрасным методом.

3) Полученные расхождения в оценках ОСВП малы по сравнению с опубликованными результатами аналогичных сопоставлений, что обусловлено, в частности, высоким пространственно-временным согласованием различных измерений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-05-07524, инфракрасные измерения, и проект 16-05-00681, микроволновые измерения). Анализ всей совокупности измерений выполнен при поддержке Российского научного фонда (проект 14-17-00096). Интерпретация ГНСС-измерений выполнена за счёт средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Представленные экспериментальные данные получены с использованием оборудования ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kiehl J. T., Trenberth K. E. // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1997. V. 78. P. 197.
2. IPCC. The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) / Ed. by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
3. Dai A., Meehl G. A., Washington W. M., et al. // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2001. V. 82. P. 2377.
4. Oltmans S. J., Vomel H., Hofmann D. J., et al. // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 21. P. 3453.
5. Trenberth K. E., Fasullo J., Smith L. // Climate Dynamics. 2005. V. 24. P. 741.
6. Nilsson T., Elgered G. // J. Geophys. Res. Atmosph. 2008. V. 113. Art. no. D19101.
7. Mieruch S., Noel S., Bovensmann H., Burrows J. P. // Atmospheric Chemistry and Phys. 2008. V. 8. P. 491.
8. Hegglin M. I., Plummer D. A., Shepherd T. G., et al. // Nature Geosci. 2014. V. 7. P. 768.
9. Азизов А. А., Гайкович К. П., Кашкаров С. С., Черняева М. Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. № 9. С. 1093.
10. Поберовский А. В. // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 1. С. 56.
11. Hase F., Hannigan J. W., Coffey M. T., et al. // J. Quant. Spectrosc. Rad. Transf. 2004. V. 87, No. 1. P. 25.
12. Семенов А. О., Виролайнен Я. А., Тимофеев Ю. М., Поберовский А. В. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 11. С. 976.
13. Rose T., Czekala H. RPG-HATPRO humidity and temperature profiler. Operating manual. Meckenheim, Germany: Radiometer Phys. GmbH, 2009. 243 p.
14. Bevis M., Businger S., Herring T., et al. // J. Geophys. Res. 1992. V. 97, No. D4. P. 787.
15. Калинин В. В. Восстановление интегрального влагосодержания атмосферы с помощью глобальных навигационных спутниковых систем: Автореф. дис... к. ф.-м. н. Казань: Институт физики Казанского (Приволжского) федерального университета, 2013. 18 с.
16. International GNSS Service, <https://igsb.jpl.nasa.gov>.
17. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана—Бьюси. М.: Наука, 1982. 200 с.
18. Niell A. // J. Geophys. Res. 1996. V. 101, No. B2. P. 3227.

19. Калинин В. В., Хуторова О. Г., Тептин Г. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. № 2, С. 96.
20. <http://www.ecmwf.int>.
21. Monitoring atmospheric water vapour. Ground-based remote sensing and in-situ methods / Ed. by N. Kampfer. ISSI Scientific Report Series, V. 10. New York, USA: Springer, 2013. 326 p.
22. Buehler S. A., Ostman S., Melsheimer C., et al. // Atmospheric Chemistry and Physics. 2012. V. 12. P. 10925.
23. Memmo A., Fionda E., Paolucci T., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2005. V. 43, No. 5. IGRSD2. P. 1050.
24. Morland J., Deuber B., Feist D. G., et al. // Atmospheric Chemistry and Phys. 2006. V. 6. P. 2039.
25. Schneider M., Romero P. M., Hasel F., et al. // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3. P. 323.
26. Ning T., Wang J., Elgered G., et al. // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9. P. 79.
27. Virolainen Y., Timofeyev Y., Berezin I., et al. // Int. J. Rem. Sens. 2016. V. 37 (16). P. 3771.

Поступила в редакцию 17 марта 2016 г.; принята в печать 27 июля 2016 г.

COMPARISON OF RADIOPHYSICAL AND OPTICAL INFRARED GROUND-BASED METHODS FOR MEASURING INTEGRATED CONTENT OF ATMOSPHERIC WATER VAPOR IN ATMOSPHERE

*D. V. Ionov, V. V. Kalinnikov, Yu. M. Timofeyev, N. A. Zaitsev, Y. A. Virolainen, V. S. Kostsov, and
A. V. Poberovskii*

By virtue of their all-weather capability, the radiophysical atmospheric sensing methods allow one, in particular, to perform continuous observations of variations in the atmospheric content of water vapor being the most important natural greenhouse gas. The measurement station of SPbSU in Peterhof (59.88° N, 29.83° E) runs a number of ground-based instruments to determine total water vapor content (TWVC) in atmosphere. During a year period from September 2014 to September 2015, the TWVC was synchronically measured by two radiophysical methods, namely, the microwave and radio-refractive techniques, as well as the optical infrared method. Comparisons show that the average systematic and random discrepancies among the three methods amount to 0.3–0.5 kg/m² (3–7%) and 0.4–0.6 kg/m² (8–11%), respectively. The maximum relative differences (up to 20%) among the results of different-type measurements are observed for very small TWVC values (below 5 kg/m²). Empirical estimates of the random errors of the methods were 0.5, 0.3, and 0.3 kg/m² for the radio-refractive, microwave, and infrared methods, respectively. The results of the TWVC measuring by the radio-refractive and microwave methods are in good agreement and better than those obtained by the optical method.

The obtained discrepancies in the TWVC estimates are small compared with the already published results of similar comparisons, which can, in particular, be attributed to the high spatiotemporal matching of various measurements.