

Сравнение наземных микроволновых измерений общего содержания водяного пара с радиозондовыми данными

И.А. Березин, Ю.М. Тимофеев, Я.А. Виролайнен, К.А. Волкова*

Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

Поступила в редакцию 13.11.2015 г.

Микроволновые (МКВ) радиометры широко используются для мониторинга общего содержания водяного пара (ОСВП) — важнейшего парникового газа в земной атмосфере. Для определения точности МКВ-метода определения ОСВП проводятся разнообразные измерительные кампании. Приведены результаты сопоставления наземных МКВ-измерений (радиометр RPG-HATPRO) ОСВП вблизи Санкт-Петербурга (Петергоф) с данными ближайшей станции радиозондирования (пос. Воейково). Сравнения включают более 850 измерений ночью и днем в период с 13.03.2013 по 31.05.2014. Показано, что рассогласования измерений ОСВП с помощью двух методов обусловлены как погрешностями самих измерений, так и пространственной неоднородностью поля влагосодержания атмосферы. Эти рассогласования могут достигать десятков процентов, что необходимо учитывать при взаимных сопоставлениях различных методов измерения ОСВП. Исключение наиболее сильного влияния пространственной неоднородности позволило заметно снизить средние расхождения МКВ и радиозондового метода до 3–4%, а стандартные рассогласования до 12–14%.

Ключевые слова: влагосодержание атмосферы, МКВ-радиометр, радиозондирование; precipitable water vapor, MW radiometer, radiosounding.

Введение

Наземные микроволновые (МКВ) методы зондирования атмосферы широко используются в настоящее время для получения температуры и влажности атмосферы, содержания озона и других климатически важных газов, водности облаков, интенсивности осадков [1–7]. Малые серии аппаратуры (микроволновые профиломеры ПМ-5 для измерений профилей температуры атмосферного пограничного слоя, радиометры RPG-HATPRO, MP-3000A и «Микрорадком» для тропосферных исследований изготавливаются в России [7, 8], Германии (Radiometer Physics GmbH) и США (Radiometrics Corporation). Существует международная сеть МКВ-зондирования атмосферы (MWRnet — An International Network of Ground-based Microwave Radiometers) [9]. В ряде научных учреждений используются собственные приборы, например, для определения интегрального содержания водяного пара и водности облаков разработаны и созданы относительно простые двухканальные МКВ-радиометры [10].

Важной проблемой является определение погрешностей дистанционных МКВ-измерений в различных условиях функционирования. Особое внимание уделяется определению погрешностей дистанционных измерений общего содержания водяного

пара (ОСВП) — важнейшего парникового газа в атмосфере Земли. Сравнениям МКВ-измерений ОСВП с данными радиозондирования посвящены работы [11–23]. Результаты сравнения МКВ и ИК спектроскопических измерений ОСВП проанализированы в статье [24].

В настоящей статье приведены сопоставления МКВ-измерений ОСВП вблизи Санкт-Петербурга (Петергоф) с измерениями на ближайшей станции радиозондирования (пос. Воейково). В условиях пространственной однородности поля влажности такие сопоставления позволяют оценить погрешности МКВ-измерений ОСВП, а при наличии пространственных вариаций ОСВП — величину этих неоднородностей, что и было целью нашей работы.

1. Измерения общего содержания водяного пара

1.1. Микроволновые измерения

МКВ-радиометр RPG HATPRO (Radiometer Physics GmbH — Humidity And Temperature Profiler) производства немецкой компании Radiometer Physics GmbH [25] имеет 7 каналов в области полосы поглощения кислорода 0,5 см и 7 каналов в области линии поглощения водяного пара 1,35 см. Прибор предназначен для определения профилей температуры и влажности в тропосфере, а также водозапаха облаков. Радиометр установлен на вышке, установленной на крыше здания НИИ физики СПбГУ.

* Иван Александрович Березин (vanchez100@yandex.ru); Юрий Михайлович Тимофеев (y.timofeev@spbu.ru); Яна Акселевна Виролайнен (yana.virolainen@spbu.ru); Кристина Андреевна Волкова (volkova_ka@list.ru).

Географические координаты 59°53' с.ш., 29°50' в.д. Прибор работает непрерывно, измерения осуществляются в режиме наблюдений в зенит (основной) и в режиме углового сканирования (дополнительный).

Осуществляется периодическая абсолютная калибровка радиометра оператором с использованием жидкого азота в соответствии с требованиями к эксплуатации. Общее содержание водяного пара определяется прибором с абсолютной погрешностью $\pm 0,3$ мм и случайной погрешностью менее 0,05 мм [25]. Анализ флуктуаций ОСВП, полученных в СПбГУ по измерениям в течение 5–15 мин (при постоянных значениях ОСВП), позволил независимо определить оценку сверху случайной ошибки измерений [24]. Для разных значений влагосодержания атмосферы эти ошибки находились в диапазоне 0,050–0,057 мм, что очень близко к приведенным выше значениям случайных ошибок.

1.2. Радиозондовые измерения

На станции радиозондирования Росгидромета в Воейково (20 км к востоку от центра Санкт-Петербурга, 59°57' с.ш., 30°42' в.д.) осуществляются регулярные запуски радиозондов (дважды в сутки), с помощью которых измеряют высотные профили относительной влажности, температуры и параметров ветра. Данные, получаемые с радиозонда (р/з), публикуются в Центральном архиве радиозондирования на сайте [26]. Погрешность радиозондовых измерений содержания водяного пара в тропосфере в среднем составляет 5–10% и более [27]. Высотные профили относительной влажности, полученные по данным радиозондирования в Воейково (запуски в 00:00 и 12:00 UTC), были проинтегрированы по высоте для получения ОС водяного пара для дней, в которые проводились МКВ-измерения ОСВП в Петергофе.

Погрешности определения ОСВП р/з 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 рассогла-

сования между радиозондовыми и МКВ-измерениями в Петергофе могут быть в определенные периоды обусловлены пространственно-временными вариациями содержания водяного пара [28].

2. Измерения ОСВП в Петергофе и Воейково

Число измерений разными приборами сильно отличается. Радиозонд дает два измерения в сутки в 00:00 и 12:00 по Гринвичу. МКВ-радиометр производит порядка 30–50 тыс. измерений в сутки (каждые 2 с). Каждому радиозондовому значению сопоставлялось среднее за 15 мин с момента запуска р/з значение ОСВП, полученное из МКВ-измерений. Для характеристики влагосодержания в Воейково и Петергофе для дневных и ночных измерений были рассчитаны средние значения ОСВП и среднеквадратические отклонения (СКО), выбраны минимальные и максимальные значения. Сравнения проводились только в отсутствие осадков, но при различных состояниях облачной атмосферы. Характеристики данных радиозондовых и МКВ-измерений приведены в табл. 1.

В Воейково средние значения ОСВП больше ночью, чем днем, суточные вариации средних значений составляют 1,69 мм. В Петергофе, наоборот, среднее ОСВП больше днем, чем ночью, а суточные вариации среднего на порядок меньше, чем в Воейково (0,16 мм). Дневные средние ОСВП в Воейково (13,27 мм) заметно меньше, чем в Петергофе (14,51 мм) – разница составляет 1,24 мм. Ночные средние близки (14,35 и 14,96 мм), и разница между ними в 2 раза меньше (0,61 мм). СКО ОСВП от среднего больше в Петергофе, чем в Воейково. В Воейково днем СКО меньше ночных (разница 1,12 мм), а в Петергофе наоборот, но они близки (разница составляет 0,17 мм). Амплитуда вариаций (разность минимального и максимального значений) ОСВП максимальна ночью в Петергофе (55,89 мм) и минимальна ночью в Воейково (39,47 мм). Отмеченные отличия в определенной степени обусловлены близостью Петергофа к водной поверхности Финского залива.

Таблица 1

Характеристики дневных (12:00 UTC) и ночных (00:00 UTC) ансамблей измерений ОСВП в Воейково и Петергофе

Измерения	Среднее значение ОСВП, мм	СКО		Значение, мм	
		абсолютное, мм	относительное, %	минимальное	максимальное
Дневные (Воейково)	13,27	7,32	55,2	1,74	46,53
Ночные (Воейково)	14,96	8,44	56,4	2,11	41,58
Дневные (Петергоф)	14,51	8,67	59,8	1,43	41,38
Ночные (Петергоф)	14,35	8,84	61,6	1,01	56,90

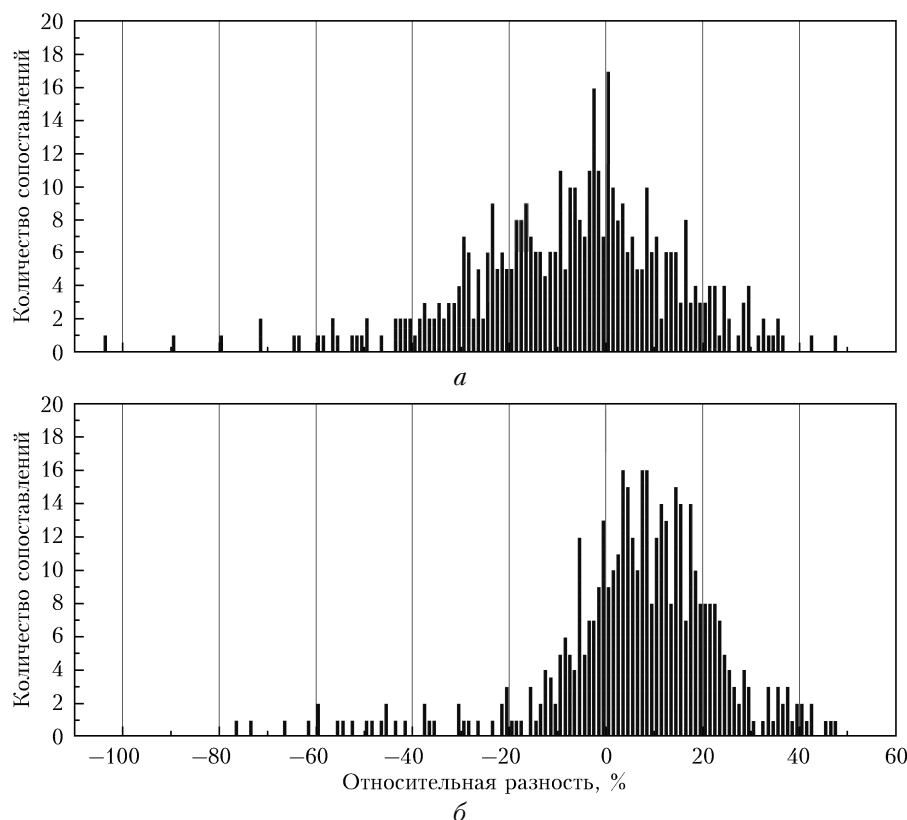


Рис. 1. Гистограмма для ОСВП, измеренного радиозондом (слева) и МКВ-радиометром (справа): *a* – день (12:00 UTC); *б* – ночь (00:00 UTC)

На рис. 1 приведены гистограммы распределения ОСВП в двух пунктах измерений. Проведенный выше краткий анализ и рис. 1 демонстрируют, что измерения р/з и МКВ-радиометром осуществляются в близких, но отличающихся состояниях атмосферы.

3. Результаты сопоставлений

Сравнение значений ОСВП, измеренных МКВ-радиометром RPG-НАТPRO (Петергоф) и р/з (Воейково), проведено за период 13.03.2013–31.05.2014 – всего 428 сопоставлений днем и 437 ночью. На рис. 2 представлены результаты сопоставлений ОСВП, измеренных двумя методами в дневное и ночное время, а также разница между ними в процентах (шкала справа внизу). В дневное время относительная разность меняется в пределах от –103 до 47%. В ночное время разность по абсолютной величине между МКВ- и р/з-измерениями несколько меньше – она меняется в пределах от –76 до 48%.

Для дневных измерений 24% абсолютных значений всех относительных разностей не превосходят 5% (и 23% для ночных), а 68% абсолютных значений всех относительных разностей не превосходят 20% (75% для ночных измерений). На рис. 3 представлены гистограммы отличий двух типов измерений.

Поскольку разности двух измерений есть измерения р/з минус измерения МКВ, то из гисто-

грамм видно, что в дневное время МКВ-метод дает большие значения (гистограмма смещена в область отрицательных значений), а в ночное время измерения МКВ дают меньшие значения ОСВП, чем р/з (гистограмма смещена в область положительных значений). Статистические характеристики сравнений двух методов приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что СК-отличие ночью составляет 2,93 мм (19,6%), а днем 3,34 мм (25,2%). Она также численно иллюстрирует, что дневные МКВ-измерения выше р/з в среднем на 1,24 мм (9,3%), а ночные меньше р/з на 0,608 мм (4,1%). Стандартные отклонения (в силу малости средних рассогласований) близки к СК-отличиям. Коэффициенты корреляции между обоими типами измерений высоки, наибольший коэффициент наблюдается для ночных измерений (0,946).

Исходя из табл. 2, можно сделать вывод, что ночные МКВ-измерения более точные – рассогласования с радиозондовыми меньше. Но это может свидетельствовать и о том, что ночью атмосферные условия в Петергофе и в Воейково более близки (см. табл. 1). При ночных измерениях значения радиозондовых измерений преимущественно больше МКВ, при дневных измерениях – наоборот.

Рис. 4 демонстрирует зависимости относительных рассогласований между двумя типами измерений (в процентах) от ОСВП в дневное и ночное время. В среднем, как и можно было ожидать, относительные рассогласования растут с уменьшением ОСВП.

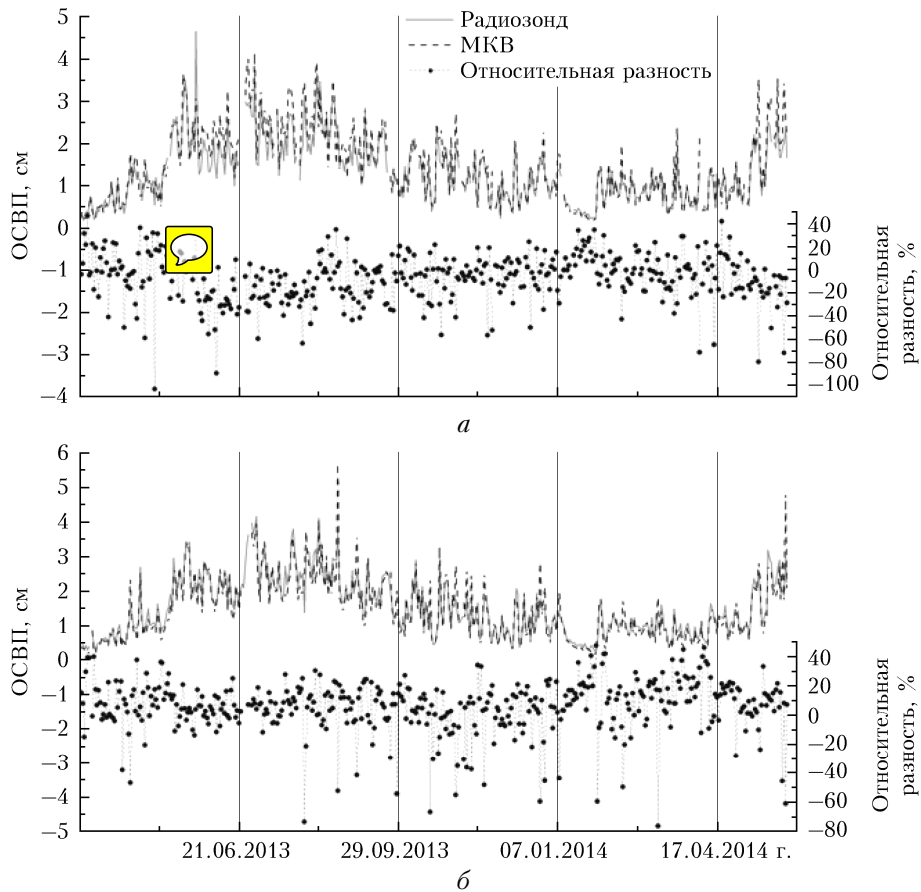


Рис. 2. ОСВП, измеренное радиозондом и МКВ-радиометром; относительная разность ОСВП, измеренного радиозондом и МКВ-методом (%): *a* – день; *b* – ночь

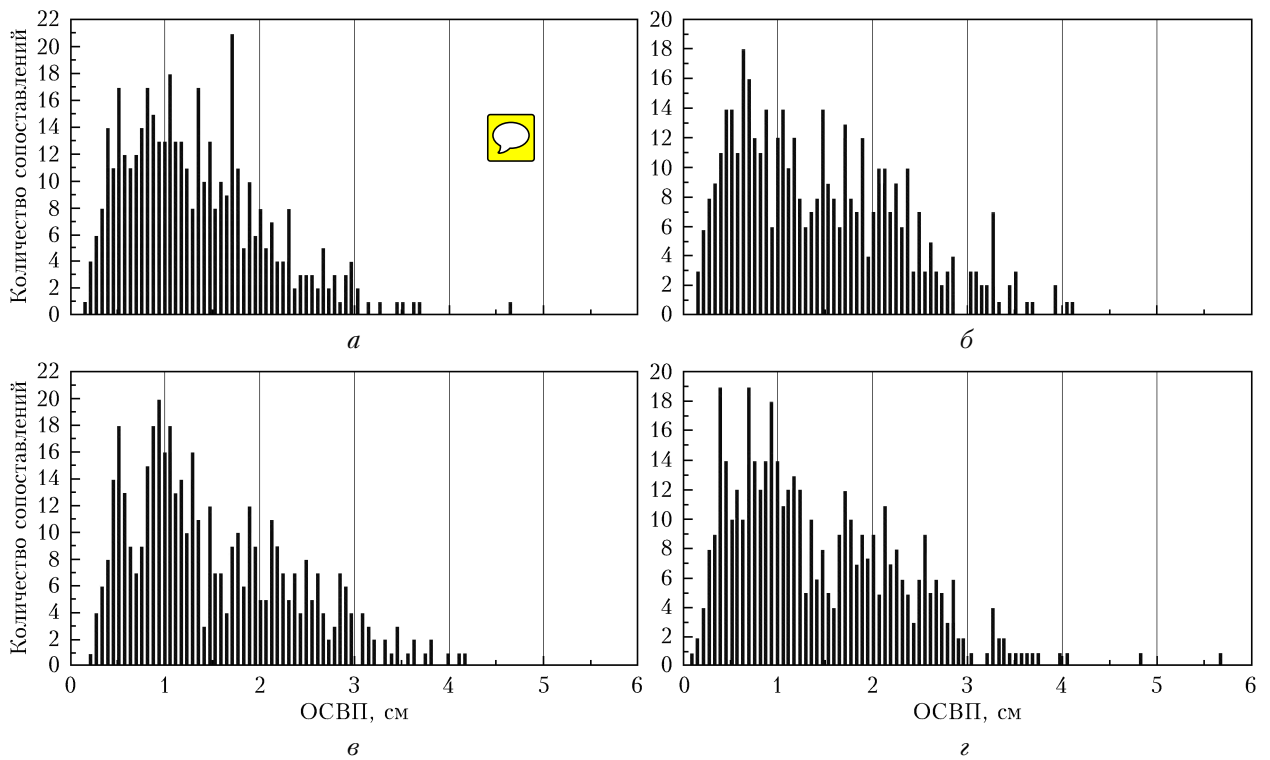


Рис. 3. Гистограмма для относительной разности данных радио- и МКВ-зондирования: *a*, *b* – день; *v*, *z* – ночь

Таблица 2

Характеристики рассогласования радиозондовых и МКВ-измерений

Измерения	N	СК-рассогласование		Среднее рассогласование		Стандартное отклонение от среднего рассогласования		Коэффициент корреляции
		мм	%	мм	%	мм	%	
Ночные	437	2,93	19,6	0,61	4,1	2,87	19,2	0,946 ± 0,005
Дневные	427	3,34	25,2	-1,24	-9,3	3,10	23,4	0,939 ± 0,006
Суточные	864	3,14	22,2	0,31	-2,2	3,13	22,1	0,934 ± 0,004

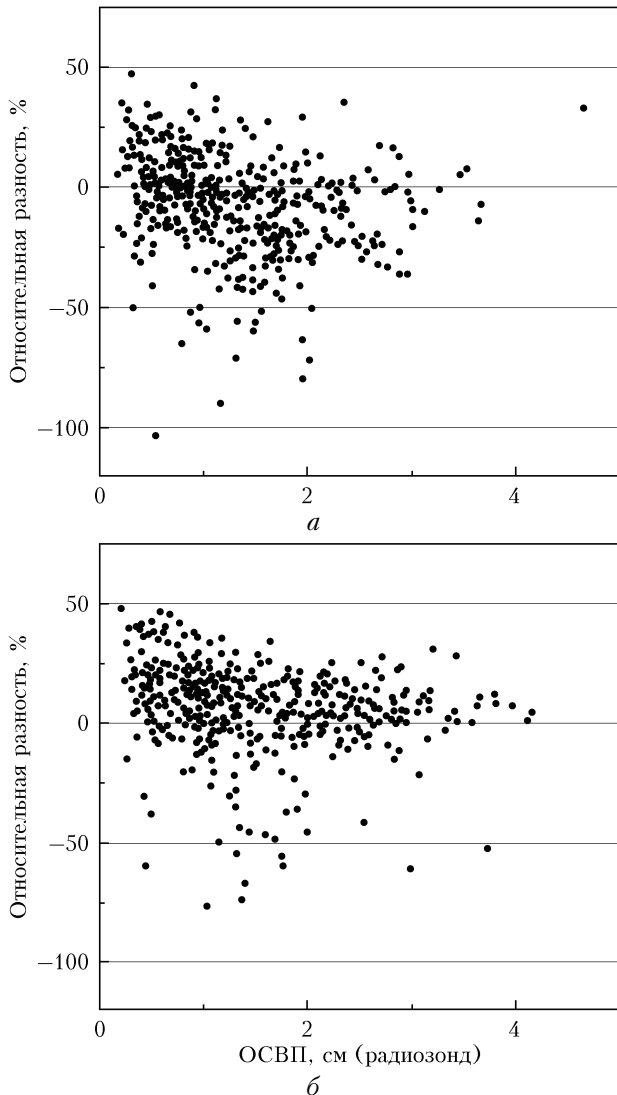


Рис. 4. Зависимость относительной разности радиозондовых и МКВ-измерений от радиозондовых измерений ОСВП: а – день; б – ночь

Рассогласования измерений ОСВП с помощью двух методов обусловлены как погрешностями самих измерений, так и пространственной неоднородностью поля влагосодержания атмосферы. Известно, что пространственные вариации ОСВП имеют мезомасштабный характер (см., например, [29]). Расстояние между двумя пунктами измерений (~ 50 км) приводит к тому, что ОСВП в Петергофе и Воейково могут за счет горизонтальной неоднородности атмосферы отличаться более чем на 100% [28].

4. Анализ влияния пространственной неоднородности поля влажности

Как мы уже отмечали, определенный вклад в отличия двух типов измерений вносит пространственная неоднородность поля влажности атмосферы. Во многих сравнениях (в частности, наземных и спутниковых) значительный вклад в рассогласования могут вносить и временные вариации влажности атмосферы. В наших сравнениях этот источник рассогласования в значительной степени исключен в связи с временным согласованием двух типов измерений.

Для уменьшения влияния пространственной неоднородности поля влажности при сравнениях р/з-измерений в Воейково и МКВ-измерений в Петергофе был проведен анализ временных зависимостей этих измерений. Исходя из этого анализа, был сформирован новый ансамбль сравнений на основе исключения случаев, когда изменения ОСВП происходили очень быстро (изменения ОСВП за сутки составлял более 40–50%) на одной или обеих станциях измерений или когда наблюдалась разнонаправленность изменений ОСВП на станциях. В табл. 3 представлены статистические характеристики сравнений ОСВП для этого подансамбля 1.

Как следует из приведенных данных для нового подансамбля 1, средние (для дня) и стандартные отклонения заметно уменьшились, а коэффициенты корреляции увеличились. Это свидетельствует о том,

Таблица 3

Характеристики рассогласования радиозондовых и МКВ-измерений для подансамбля 1

Период	Количество сопоставлений	Среднее рассогласование		Стандартное отклонение от среднего рассогласования		Коэффициент корреляции
		мм	%	мм	%	
День	254	-0,44	-3,4	1,87	14,4	0,974 ± 0,003
Ночь	295	0,72	4,5	1,84	11,6	0,978 ± 0,003

что влияние пространственной неоднородности поля влажности для этого подансамбля уменьшилось.

В дальнейшем анализе в качестве критерия однородности поля влажности было выбрано значение относительной разности между наземными измерениями абсолютной влажности в Воейково и Ломоносове (3 км от Петергофа). Каждый ансамбль сопоставлений (дневной и ночной) был разбит на 4 подансамбля на основе выбранного критерия однородности поля влажности: относительная разность абсолютной влажности в Воейково и Ломоносове меняется от 0 до 3, от 3 до 6, от 6 до 15% и более 15%.

Как показали новые расчеты для дневных измерений, учет отличий наземных измерений абсолютной влажности позволил уменьшить отличия между МКВ- и р/з-измерениями в стандартных отклонениях до ~ 12% при отличиях в наземной абсолютной влажности в диапазоне 0–15% и резко увеличить отличия между измерениями в Воейково и Петергофе до 21% при отличиях в наземной абсолютной влажности более 15%. Для ночных сравнений такого эффекта не наблюдалось. Для всех подансамблей сравнений относительные отличия между МКВ- и р/з-измерениями составляли 10–13%.

5. Обсуждение результатов

Примеры результатов проведенных ранее сравнений измерений ОСВП МКВ радиометрами и радиозондами даны в табл. 4. Приведены сравнения радиометров, использующих измерения в линии поглощения водяного пара при 22 ГГц. Указаны средние отклонения, стандартные отклонения и коэффициенты корреляции.

Сравнения различных типов радиозондов с МКВ-измерениями ОСВП анализировались в работе [12]. В сравнениях использовался двухканальный МКВ-радиометр, измерявший нисходящее атмосферное излучение в линии поглощения водяного пара и вне ее (22,6 и 31,6 ГГц). Сравнения проводились в летнее время (Денвер, США) в 1987 г. Приведенные в табл. 4 отличия достаточно велики и составляли для средних отклонений 0,75–3,21 мм. Можно также отметить, что они были больше в дневное время, что, по мнению авторов, работы связано с влиянием температуры на функционирование МКВ-прибора, а главное – с влиянием солнечного излучения на показания радиозондов. В дальнейшем такие сравнения позволили выявить и исключить многие причины некачественных измерений как для МКВ-радиометров, так и для радиозондов различного типа.

В работе [18] приведены многочисленные сравнения МКВ двухканальных измерений ОСВП с радиозондовыми измерениями в Центральной Италии. Средние расхождения составляли –1,18 мм, стандартные отклонения 3,02 мм (несмотря на географическую близость двух типов измерений ~ 2 км). Длительные исследования МКВ-измерений ОСВП проводились в Институте прикладной физики (Берн, Швейцария) [19–22]. В табл. 4 приведены результаты сравнений различных МКВ-радиометров (TP/WVP-3000, ASMUWARA, TROWARA) с радиозондами, а также сравнений самих радиометров (TP/WVP-3000 и ASMUWARA). Абсолютные величины систематических отличий двух типов измерений для разных радиометров составляют 0,11–0,35 мм, СК отличия ~ 2 мм. Пример сравнения 4 дан для двух радиозондов, расположенных на 40 км (Payerne) и 25 км (Thun) от МКВ-радиометра TROWARA.

Таблица 4

Примеры сравнения МКВ-измерений ОСВП и радиозондов

Пример	Отклонение, мм		R^{**}	Число сравнений	Место, период	Ссылка
	среднее	стандартное				
1	1,11–2,7	1,04–2,62	0,950	28–89	Денвер, США, июль–август 1987	[12]
	1,62–3,21 – день	0,70–1,22		16–19		
	0,75–2,03 – ночь	0,75–2,03		12–28		
2	–1,18	3,02	0,950	1573	Центральная Италия, август 2002 – декабрь 2003	[18]
3*	0,11 – А	~2	0,970	183	Швейцария, 2003–2004	[19]
	–0,12 – В			169		
	0,14 – С			3072		
	–0,35 – D					
	0,40 – D ¹					
4	Payerne – 0,20	2,00	0,946	2723	Швейцария, 1994–2007	[22]
	Thun – 0,37	2,50		164		
5	Ночь – 0,61	2,90	0,939	437	Петергоф–Воейково, 2013–2014	Данная работа
	День – 1,24	3,10		428		
6	Ночь – 0,44	1,87	0,974	295	Петергоф–Воейково, 2013–2014	Данная работа
	День – 0,44	1,84		254		

* Пример 3: А – сравнение с МКВ-радиометром TP/WVP-3000; В – сравнение с радиометром ASMUWARA; С – сравнения двух радиометров TP/WVP-3000 и ASMUWARA; D – радиометр TROWARA; D¹ – после коррекции. ** – коэффициент корреляции.

При этом отмечается, что расхождения обусловлены, в основном, отличием в состоянии атмосферы для трех пунктов измерений. Интересно отметить, что сравнения двух МКВ-радиометров (TR/WVP-3000 и ASMUWARA) дали минимальные СК-отличия 0,37 мм.

Сравнения МКВ-измерений и радиозондирования в СПбГУ (пример 5, табл. 4) показывают значительные средние и стандартные отклонения, что обусловлено большой удаленностью двух типов измерений (50 км). Близкие стандартные отклонения наблюдались и при сравнениях измерений радиометром TROWARA (~ 2 мм) с радиозондовыми измерениями на расстоянии ~ 40 км [20]. Таким образом, в ряде задач, например при валидации спутниковых измерений необходимо внимательно отслеживать пространственную горизонтальную неоднородность поля водяного пара. Исключение наиболее сильного влияния пространственной неоднородности (пример 6, табл. 4) заметно снизило стандартные отклонения между МКВ- и радиозондовыми измерениями. Приведенные средние (3–4%) и стандартные отклонения (12–14%) (пример 6, табл. 4) дают оценку сверху отклонений МКВ и радиозондовых измерений ОСВП, обусловленных погрешностями двух типов измерений.

В работе [24] были проведены сопоставления ИК спектроскопического метода измерений ОСВП по прямому Солнцу и МКВ-метода для 138 дней измерений в Петергофе в тот же период наблюдений. В [24] 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 10 мм ~ 1%. Стандартные отклонения между двумя методами достигают 7% при значениях ОСВП менее 4 мм. С ростом ОСВП оно уменьшается и при ОСВП более 10 мм составляет 3–5%. Если предположить, что МКВ-измерения имеют **СК-погрешности** ~ 5–7%, а радиозондовые ~ 5%, то отличия измерений ОСВП (пример 6, табл. 4) близки к суммарному вкладу погрешностей измерений этих двух методов измерений.

Заключение

Мы сопоставили наземные измерения ОСВП с помощью МКВ-радиометра RPG-NATPRO (Петергоф) с данными радиозондирования (Воейково). Станции расположены на расстоянии ~ 50 км друг от друга. Сравнения включают более 850 измерений ночью и днем в период с 13.03.2013 по 31.05.2014. Каждому радиозондовому значению (начало измерений 12:00 и 00:00 UTC) сопоставлялось осредненное значение по МКВ-измерениям за 15 мин с момента запуска радиозонда. Оба метода измерений были максимально согласованы по времени. Анализ МКВ- и р/з-измерений показал, что они осуществлялись в близких, но в определенной степени различных состояниях атмосферы, что позволяет сделать вывод о том, что пространственная неоднородность

водяного пара является существенным фактором, влияющим на качество валидации различных типов измерений.

Для дневных измерений 24% абсолютных значений всех относительных разностей не превосходят 5% (и 23% для ночных), а 68% абсолютных значений всех относительных разностей не превосходят 20% (75% для ночных измерений).

Дневные измерения МКВ выше р/з в среднем на 1,24 мм (9,3%), а ночью они меньше р/з на 0,608 мм (4,1%). Ночью СК-отличия составляет 2,93 мм (19,6%), а днем 3,34 мм (25,2%). Наибольший коэффициент корреляции между двумя типами измерений наблюдается для ночных измерений – 0,946. Рассогласования измерений ОСВП с помощью двух методов обусловлены как погрешностями самих измерений, так и пространственной неоднородностью поля влагосодержания атмосферы.

Для минимизации влияния на сравнения методов пространственной неоднородности поля влажности был сформирован новый ансамбль сравнений путем исключения случаев, когда изменения ОСВП происходили очень быстро (изменения ОСВП за сутки более 40–50%) на одной или обеих станциях измерений или когда наблюдалась разнонаправленность изменений ОСВП на станциях. Для нового подансамбля средние (для дня) и стандартные отклонения заметно уменьшились, а коэффициенты корреляции увеличились. Средние (3–4%) и стандартные (12–14%) отклонения дают в этом случае оценку сверху отклонений МКВ и радиозондовых измерений ОСВП, обусловленных погрешностями двух типов измерений. Если предположить, что МКВ-измерения имеют СК-погрешности ~ 5–7% (на основе анализа результатов работы [24]), а радиозондовые ~ 5%, то видно, что отличия измерений ОСВП близки к суммарному вкладу погрешностей измерений этих двух методов измерений.

Экспериментальные исследования проведены на аппаратуре РЦ «Геомодель» СПбГУ при финансовой поддержке гранта РФФИ 15-05-07524. Обработка и анализ данных выполнены за счет финансирования по гранту Российского научного фонда № 14-17-00096. Обсуждения и подготовка статьи выполнены в рамках НИР СПбГУ № 11.42.1380.2015 (Мероприятие 6).

1. Гурвич А.С., Еришов А.Г., Наумов А.П., Плечков В.М. Исследование влагосодержания атмосферы методом наземной радиотеплолокации // Метеорол. и гидрол. 1972. № 5. С. 22–27.
2. Горелик А.Г., Калашиников В.В., Райкова Л.С., Фролов Ю.А. Радиотепловые измерения влажности атмосферы и интегральной водности облаков // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1973. Т. 9, № 5. С. 928–936.
3. Жевакин С.А. О радиотеплолокационном определении интегральной влажности атмосферы и интегральной водности, температуры и высоты капельной фазы облаков // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21, № 8. С. 1122–1231.
4. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометиздат, 1987. 283 с.

5. Горелик А.Г., Фролов Ю.А., Шукин Г.Г. Комплексные СВЧ- и ИК-радиометрические исследования облачности // Труды ГГО. 1989. Вып. 526. С. 3–15.
6. Шукин Г.Г., Степаненко В.Д., Образцов С.П., Караваяев Д.М., Жуков В.Ю., Рыбаков Ю.В. Состояние и перспективы радиофизических исследований атмосферы и подстилающей поверхности // Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 143–167.
7. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя – метод, аппаратура, результаты измерений // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 7. С. 697–704.
8. Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Троицкий А.В., Точилкина Т.А., Шапошников А.Н. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 459–465.
9. URL: <http://cetemps.aquila.infn.it/mwrnet/>
10. Шукин Г.Г., Караваяев Д.М. Некоторые результаты и перспективы исследований в области СВЧ-радиометрии (радиотеплолокации), проводимых в ГГО им. А.И. Воейкова // Успехи зарубежной радиоэлектроники. 2008. № 6. С. 29–37.
11. Рабинович Ю.И., Шукин Г.Г. Определение содержания водяного пара в атмосфере по измерению микроволнового излучения // Труды ГГО. 1968. Вып. 222. С. 62–73.
12. Westwater E.R., Falls M.J. Ground-based microwave radiometric observations of precipitable water vapour: A comparison with ground truth from two radiosonde observation systems // J. Atmos. Ocean. Techn. 1989. V. 6, N 8. P. 7240730.
13. Han Y., Snider J.B., Westwater E.R., Melfi S.H., Ferrare R.A. Observations of water vapor by ground-based microwave radiometers and Raman lidar // J. Geophys. Res. 1994. 99(D9). P. 18695–18702. DOI: 10.1029/94JD01487.
14. Караваяев Д.М., Шукин Г.Г. Влагозапас атмосферы и водозапас облаков по данным СВЧ-радиометрических измерений // Труды НИЦ ДЗА. «Прикладная метеорология». 1997. Вып. 1(546). С. 6–13.
15. Guldner J., Spankuch D. Results of year-round remotely sensed integrated water vapor by ground-based microwave radiometry // J. Appl. Meteor. 1999. V. 38, N 7. P. 981–988.
16. Westwater E.R., Han Y., Shupe M.D., Matrosov S.Y. Analysis of integrated cloud liquid and precipitable water vapor retrievals from microwave radiometers during the surface heat budget of the Arctic Ocean project // J. Geophys. Res. D. 2001. V. 106, N 23. P. 32019–32030.
17. Ywei-An Liou, Yu-Tun Teng, Teresa Van Hove, James C. Liljegen comparison of precipitable water observations in the near tropics by GPS, microwave radiometer, and radiosondes // J. Appl. Meteor. 2001. N 40. P. 5–15.
18. Memmo A., Ermanno F., Tiziana P. *et al.* Comparison of MM5 integrated water vapor with microwave radiometer, GPS, and radiosonde measurements // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43, N 5. P. 1050–1058.
19. Martin L., Matzler C., Tim J., Hewison T.J., Ruffieux D. Intercomparison of integrated water vapour measurements // Meteorologische Zeitschrift. 2006. V. 15, N 1. P. 57–64. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0098.
20. Morland J., Deuber B., Feist D.G., Martin L. *et al.* The STARTWAVE atmospheric water database // Atmos. Chem. Phys. 2006. V. 6. P. 2039–2056. [Электронный ресурс]. URL: www.atmos-chem-phys.net/6/2039/2006/
21. Morland J., Collaud Coen M., Hocke K., Jeannot P., Mätzler C. Tropospheric water vapour above Switzerland over the last 12 years // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 5975–5988. [Электронный ресурс]. URL: www.atmos-chem-phys.net/9/5975/2009/
22. Mätzler C., Morland J. Refined physical retrieval of integrated water vapor and cloud liquid for microwave radiometer data // IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing. 2009. V. 47, N 6.
23. Караваяев Д.М., Шукин Г.Г. СВЧ-радиометрические исследования влаговодосодержания атмосферы в период развития конвективных облаков и гроз // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Физика атмосферы. 2010. Спецвыпуск. С. 53–58.
24. Березин И.А., Виrolайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поборовский А.В. Сравнения ИК- и МКВ-наземных методов измерений общего содержания водяного пара // Изв. РАН. 2016. Т. 52. № 1 (В печати).
25. Rose Th., Czekala H. Accurate atmospheric profiling with the RPG-HATPRO humidity – and temperature profiler // RPG, Meckenheim, Germany. 2005.
26. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
27. Фридзон М.Б., Ермошенко Ю.М. Радиозондирование атмосферы // Мир измерений. 2009. № 7. [Электронный ресурс]. URL: <http://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=30717>
28. Семенов А.О., Виrolайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поборовский А.В. Сравнение наземных ИК-спектроскопических измерений общего содержания водяного пара с данными радиозондовых измерений // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 11. С. 976–980.
29. Vogelmann H., Sussmann R., Trickl T., Reichert A. Spatio-temporal variability of water vapor investigated by lidar and FTIR vertical soundings above Mt. Zugspitze // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2014. V. 14. P. 28231–28268. [Электронный ресурс]. URL: www.atmos-chem-phys-discuss.net/14/28231/2014/acpd-14-28231-2014. DOI: 10.5194.

I.A. Berezin, Yu.M. Timofeyev, Ya.A. Virolainen, K.A. Volkova. Intercomparison of ground-based mw measurements of precipitable water vapour with radiosounding data.

Microwave (MW) radiometers are commonly used for monitoring of precipitable water vapour (PWV) – the major atmospheric greenhouse gas. The quality and accuracy of the method is assessed in various measuring campaigns. In this study, we intercompare the results of PWV measurements performed with ground-based MW radiometer RPG-HATPRO (at the Peterhof station of Saint Petersburg State University) and radiosounding data obtained at the Voeikov station. The dataset includes more than 850 coincident measurements (at the day and at the nighttime) for the period between 13.03.2013 and 31.05.2014. The discrepancy of the both methods is caused by the errors of methods as well as by the spatial inhomogeneity of the fields of PWV in atmosphere. These mismatches can reach tens of percent, which must be taken into account in the intercomparison and validation of different methods for PWV retrieval. The exclusion of cases with significant moisture inhomogeneity allowed the reducing of mean errors and their standard deviation between two sets of measurements up to 3–4% and 12–14%, respectively.