

## Сравнение наземных ИК-спектроскопических измерений общего содержания водяного пара с данными радиозондовых измерений

А.О. Семёнов, Я.А. Виролайнен, Ю.М. Тимофеев,  
А.В. Поберовский\*

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

Поступила в редакцию 16.06.2014 г.

Проведено сопоставление измерений общего содержания водяного пара в атмосфере вблизи Санкт-Петербурга с помощью радиозондирования на ст. Воейково и наземным ИК-спектроскопическим методом в г. Петергофе в период с 2009 по 2012 г. Несмотря на хорошую корреляцию данных дневных измерений в Петергофе и Воейково, среднеквадратические рассогласования значительны и достигают 20% и более для большинства подансамблей, отобранных для сравнения. Сильное рассогласование обусловлено, главным образом, естественной пространственной изменчивостью общего содержания водяного пара (с учетом удаленности Петергофа от Воейково на 50 км), что необходимо учитывать при валидации спутниковых измерений общего содержания водяного пара по различным наземным измерениям.

*Ключевые слова:* водяной пар, Фурье-спектрометрия, радиозондирование; water vapor, Fourier spectrometry, radio sounding.

### Введение

Водяной пар является важнейшим естественным парниковым газом и играет огромную роль в различных физических и химических процессах в атмосфере Земли [1]. Существует много различных методов для изучения его пространственных и временных вариаций, как локальных, так и дистанционных, но в ряде случаев трудно объективно оценить погрешности измерений содержания водяного пара.

Сравнение методов определения содержания водяного пара (наземных, самолетных, спутниковых, локальных и дистанционных) проводилось неоднократно (см., например, [2]). В настоящей статье сравниваются значения общего влагосодержания атмосферы, полученные с помощью радиозондирования (ст. Воейково) и наземным ИК-спектроскопическим методом (СПБГУ, г. Петергоф). В зависимости от состояния атмосферы данные сопоставлений могут служить информацией либо о пространственно-временной неоднородности общего содержания (ОС) водяного пара в области измерений (точки измерений отстоят примерно на 50 км), либо о согласованности двух типов наблюдений.

### Методика наземных ИК-спектроскопических измерений

С помощью наземного спектрального комплекса на базе Фурье-спектрометра высокого спектрального разрешения Bruker IFS-125HR нами в СПбГУ на кафедре физики атмосферы физического факультета (в Петергофе, в 35 км к юго-западу от центра Санкт-Петербурга, 59°53' с.ш., 29°50' в.д., высота 36 м над у.м.) измеряются спектры прямого солнечного излучения в ИК-области спектра с высоким спектральным разрешением [3]. Измерения проводятся при безоблачном небе либо в достаточно больших разрезах облаков. Интерпретация ИК-измерений была проведена с помощью программного комплекса PROFFIT [4], разработанного в Университете Карлсруэ (Германия) и используемого на ряде станций международной измерительной сети NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). Для каждого дня спектрометрических измерений на ст. Петергоф задавалась метеорологическая информация (профили давления и температуры), полученная с помощью системы автоматической электронной почты NASA GODDARD SPACE CENTER [5], а также априорная информация о профилях атмосферных параметров по данным численной модели WACCM (The Whole Atmosphere Community Climate Model) [6]. В качестве данных о параметрах тонкой структуры линий поглощения использовалась база данных

\* Алексей Олегович Семёнов (aleksem@mail.ru); Яна Акселевна Виролайнен (Yana.Virolainen@spbu.ru); Юрий Михайлович Тимофеев (tim@JT14934.spb.edu); Анатолий Васильевич Поберовский (avpob@troll.phys.spbu.ru).

NITRAN-2008 [7]. Определение ОС водяного пара осуществлялось с помощью измерений спектров солнечного излучения (с разрешением  $\sim 0,005 \text{ см}^{-1}$ ) в шести спектральных интервалах: 1110,00–1113,00; 1117,30–1117,90; 1120,10–1122,00; 1196,00–1200,40; 1220,50–1221,50; 1251,75–1253,00  $\text{см}^{-1}$ . Кроме линий поглощения водяного пара учитывалось и уточнялось поглощение в линиях  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$ . Случайные погрешности ИК-измерений ОС водяного пара оцениваются в 1–2%, систематические – 3–5% [8]. Полная погрешность оценивается примерно в 5%.

## Радиозондовые измерения

На станции радиозондирования Росгидромета в пос. Воейково (20 км к востоку от центра Санкт-Петербурга,  $59^\circ 57'$  с.ш.,  $30^\circ 42'$  в.д., высота 78 м над у.м.) осуществляются регулярные запуски радиозондов (дважды в сутки), с помощью которых измеряют высотные профили относительной влажности, температуры и параметров ветра. Данные, получаемые с радиозонда, публикуются в центральном архиве радиозондирования на сайте [9]. Погрешность радиозондовых измерений ОС водяного пара в тропосфере в среднем составляет 5–10% и более [10]. Высотные профили относительной влажности, полученные по данным дневного радиозондирования в Воейково (запуск в 12:00 UTC), были проинтегрированы по высоте с целью определения ОС водяного пара для дней, когда проводились спектроскопические измерения в Петергофе. В результате получилось 182 дня радиозондовых и ИК-измерений, сделанных в один и тот же день.

## Анализ результатов сравнения двух типов измерений

Отличия в данных измерений двух типов  $\delta$  можно представить в виде суммы

$$\delta \approx \delta_{\text{рз}} + \delta_{\text{ик}} + \delta_1 + \delta_2, \quad (1)$$

где компоненты  $\delta_{\text{рз}}$  и  $\delta_{\text{ик}}$  обусловлены погрешностями двух типов измерений, а  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – пространственными и временными вариациями ОС водяного пара. Погрешности определения ОС водяного пара с помощью радиозонда зависят от соотношений случайных и систематических погрешностей и лежат в диапазоне  $\sim 5$ –8%. Суммарная погрешность определения ОС водяного пара из ИК-спектроскопических измерений составляет в среднем  $\sim 5\%$ . В общем случае величины  $\delta_1$  и  $\delta_2$  могут достигать больших значений, с учетом возможных существенных пространственных и временных вариаций  $\text{H}_2\text{O}$ , значительного удаления Петергофа от Воейкова и временных отличий между радиозондовыми и спектроскопическими измерениями. Таким образом, в условиях горизонтальной однородности и стационарности полей влажности вблизи Санкт-Петербурга рассогласования между двумя типами измерений будут характеризовать их суммарные погрешности, а при невыполнении этих условий – пространственно-временная неоднородность поля интегральной влажности. Используя различные подансамбли сравнений, можно попытаться оценить обе компоненты рассогласований. Сравнение двух типов измерений проводилось для различных подансамблей (таблица).

Характеристики сопоставлений различных подансамблей двух типов измерений

Тип сопоставлений, ограничения	Количество сопоставлений	Абсолютное рассогласование ( $M \pm S$ ), $\text{кг}/\text{м}^2$	Относительное рассогласование ( $M \pm S$ ), %	Коэффициент корреляции
<i>Усредненные за день измерений спектроскопические и дневные радиозондовые измерения</i>				
Все сопоставления	182	$-0,27 \pm 2,62$	$-2,34 \pm 21,2$	$0,956 \pm 0,006$
Ветер:				
северный	27	$-0,19 \pm 1,85$	$-3,97 \pm 18,4$	$0,973 \pm 0,010$
восточный	46	$0,30 \pm 3,02$	$3,03 \pm 21,8$	$0,954 \pm 0,013$
южный	47	$-0,32 \pm 2,93$	$-2,21 \pm 26,5$	$0,953 \pm 0,013$
западный	62	$-0,69 \pm 2,33$	$-4,72 \pm 17,1$	$0,955 \pm 0,011$
сильный	107	$-0,31 \pm 2,89$	$-1,91 \pm 23,5$	$0,939 \pm 0,011$
слабый	75	$-0,21 \pm 1,17$	$-2,95 \pm 17,53$	$0,974 \pm 0,006$
Зима	30	$-0,38 \pm 0,69$	$-10,9 \pm 21,0$	$0,860 \pm 0,048$
Весна	65	$0,27 \pm 2,59$	$2,38 \pm 27,2$	$0,903 \pm 0,023$
Лето	67	$-0,47 \pm 3,26$	$-1,18 \pm 15,9$	$0,871 \pm 0,030$
Осень	20	$-1,17 \pm 2,18$	$-8,79 \pm 13,4$	$0,963 \pm 0,016$
Стабильные условия	154	$-0,50 \pm 2,17$	$-3,74 \pm 16,2$	$0,971 \pm 0,004$
<i>Единичные дневные спектроскопические и радиозондовые измерения, временной интервал между которыми не превышал заданного интервала</i>				
Временной интервал:				
не более 1 ч	111	$-0,06 \pm 2,34$	$-1,66 \pm 22,1$	$0,961 \pm 0,007$
не более 30 мин	75	$0,16 \pm 2,37$	$0,35 \pm 23,8$	$0,961 \pm 0,009$
<i>Среднемесячные спектроскопические и радиозондовые измерения</i>				
Все сопоставления	28	$-0,39 \pm 0,98$	$-5,30 \pm 11,1$	$0,993 \pm 0,003$

Сравнение наземных ИК-спектроскопических измерений общего содержания водяного пара...

На рис. 1 спектроскопические измерения ОС водяного пара в Петергофе, усредненные за день измерений, сопоставлены с радиозондовыми измерениями ОС в Воейково (50 км от Петергофа) за весь период сравнений. В течение рассматриваемого периода ОС водяного пара изменялось более чем на порядок. Средние ОС для всего периода наблюдений для Петергофа и Воейкова очень близки – 13,31 и 13,58 кг/м<sup>2</sup> соответственно. Минимальные и максимальные значения ОС составляли для Петергофа 1,66 и 38,7 кг/м<sup>2</sup> и для Воейкова 2,07 и 36,4 кг/м<sup>2</sup>.

Величины относительной разности между спектроскопическими измерениями ОС водяного пара в Пе-

тергофе и радиозондовыми в Воейково могут достигать 30–40% по модулю и даже более (рис. 2, а). Однако 86% всех относительных разностей по модулю не превышает 25%, а 57% этих разностей лежит в интервале от –15 до +10% (см. гистограмму на рис. 2, б, на которой представлено количество дней, для которых относительное изменение попадало в заданный интервал с шагом 1%).

Общий диапазон отклонений между двумя типами измерений составлял от 2–3 до более 100%. Максимальное отклонение между спектроскопическими измерениями ОС водяного пара в Петергофе и радиозондовыми в Воейково наблюдалось 23 мая 2011 г.

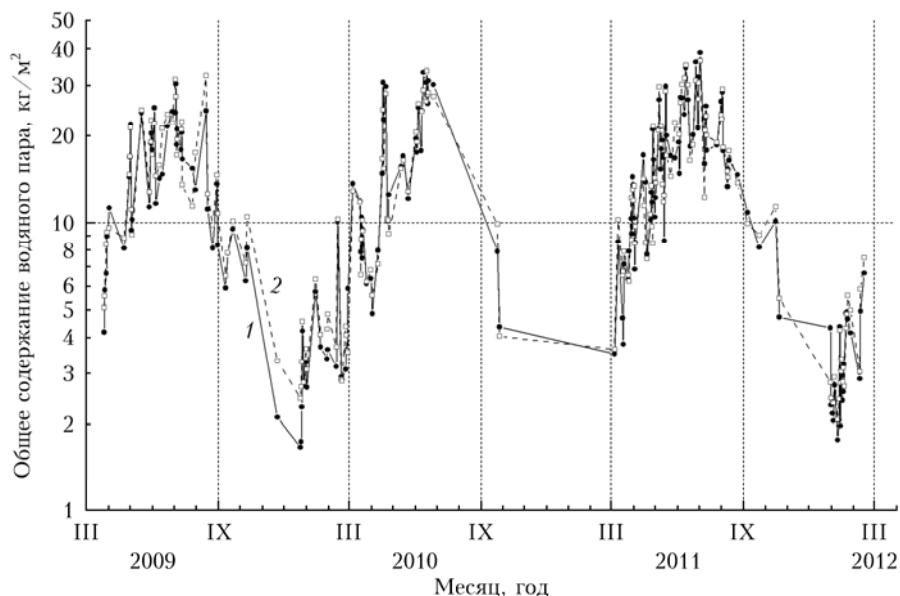


Рис. 1. Сезонный ход ОС водяного пара, полученный по наземным ИК-спектроскопическим измерениям в Петергофе (1) и с помощью радиозондирования в Воейково (2). Относительная разность этих измерений показана на рис. 2

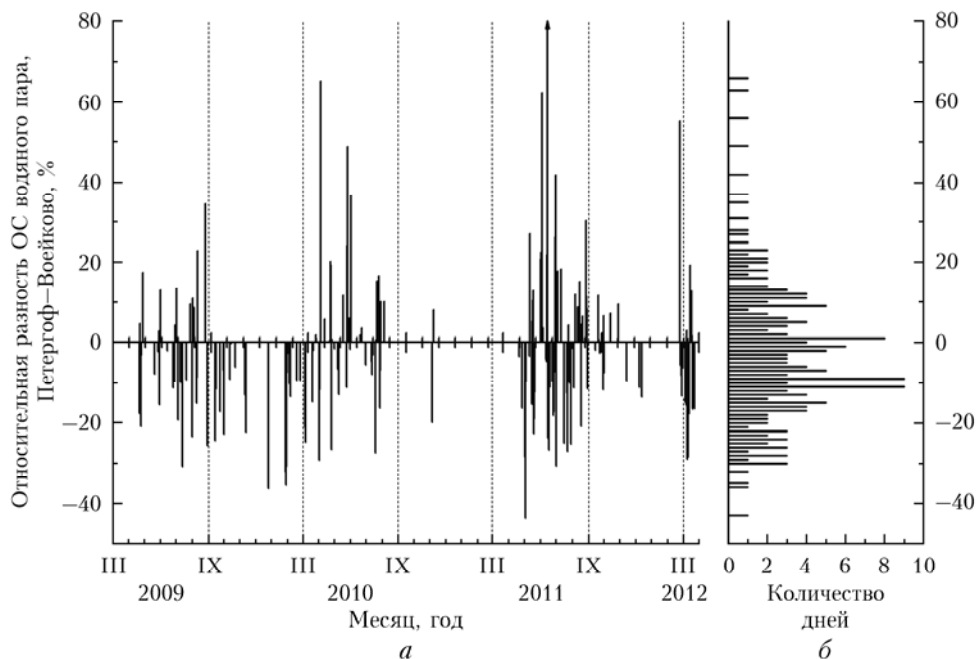


Рис. 2. Относительная разность ИК-спектроскопических и радиозондовых измерений ОС водяного пара (а) и гистограмма для этой разности (б)

и равнялось 149% (на рис. 2, *a* отмечено стрелкой, выводящей за пределы диапазона графика). В этот день ОС водяного пара по измерениям в Петергофе было  $21,1 \text{ кг/м}^2$ , а в Воейково всего  $8,46 \text{ кг/м}^2$ . Однако на следующий день ОС водяного пара в Воейково уже достигло  $21,6 \text{ кг/м}^2$ , а в Петергофе  $16,5 \text{ кг/м}^2$ , т.е. буквально через сутки в Воейково наблюдался такой же уровень влажности в столбе атмосферы, как и в Петергофе днем ранее, но измерения, сделанные в один день, показали существенное отличие влажности. Эти два дня последовательных измерений наиболее ярко иллюстрируют сильные пространственно-временные изменения ОС водяного пара, достигающие  $\sim 13 \text{ кг/м}^2$ , обусловленные движением воздушных масс воздуха. Представляется обоснованным, что большие рассогласования порядка 40–60% и выше в основном являются следствием значительной пространственной неоднородности поля влажности в районе Санкт-Петербурга.

Для анализа сопоставления двух рядов данных (спектроскопических и радиозондовых) использовались средние  $M$  и среднеквадратические  $S$  рассогласования, а также линейный коэффициент корреляции.

Результат сопоставления спектроскопических измерений ОС водяного пара в Петергофе, усредненных за день измерений, и радиозондовых измерений в Воейково представлен в таблице. При сопоставлении всех 182 дней измерений коэффициент корреляции оказался довольно высоким (0,956), однако среднеквадратическое рассогласование получилось большим (около 21%). Сравнение подансамблей для разных направлений ветра следует делать с осторожностью, так как эти подансамбли содержат разное количество сопоставлений и измерения, сделанные в разные сезоны. Тем не менее обращают на себя внимание относительно малые  $S$  ( $\sim 17$ –18%) при северном, западном и слабом ветрах. Наоборот, мак-

симальные относительные рассогласования наблюдались при южном ветре.

Сравнение двух типов измерений в различные сезоны показало минимальные относительные рассогласования летом и осенью, но минимальные абсолютные рассогласования наблюдались зимой. Эти особенности связаны с сезонными вариациями ОС – максимальными значениями летом и минимальными зимой. (Минус в  $M$  означает, что в Петергофе в среднем ОС водяного пара получилось меньше, чем в Воейково.) В зависимости от анализируемого ансамбля значения средних отклонений  $M$  и среднеквадратических рассогласований  $S$  сильно варьируются. Для всего ансамбля сопоставлений  $M = -0,27$  ( $-2,34\%$ ) и  $S = 2,62 \text{ кг/м}^2$  (21,2%).

Минимальное  $M$  наблюдается для ансамбля с временным интервалом сравнения 1 ч –  $M = -0,06$  ( $-1,66\%$ ), максимальное  $M = -1,17$  отмечается осенью ( $-8,79\%$ ). Минимальные  $S = 0,69$  (21%) встречаются зимой, максимальные  $3,26$  (15,9%) летом. Но эта зависимость обусловлена сезонным ходом ОС – изменениями ОС более чем на порядок.

Сравнения измерений при временных отличиях в 0,5 и 1 ч не привели к заметному уменьшению рассогласований, что указывает на то, что основной причиной больших рассогласований является пространственная неоднородность поля влажности. Типичные абсолютные среднеквадратические рассогласования из работы [2], полученные также с интервалом времени не более 1 ч между различными типами измерений ОС водяного пара в Северной Швеции (радиозонды, ИК-, GPS-, МКВ-радиометры и т.д.), но для менее удаленных точек измерений, лежат в диапазоне от 0,66 до  $2,66 \text{ кг/м}^2$ . Таким образом, абсолютное среднеквадратическое рассогласование из таблицы ( $2,34 \text{ кг/м}^2$ ) лежит в верхней части диапазона (см. [2]).

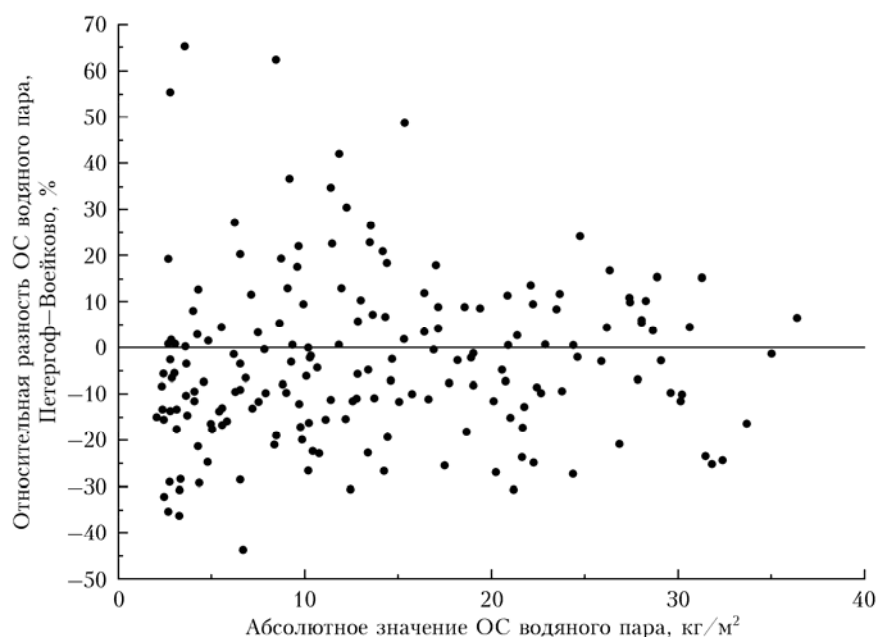


Рис. 3. Относительная разность среднедневных измерений ОС водяного пара в Петергофе и Воейково как функция абсолютного значения ОС

Средние расхождения, полученные нами, также хорошо согласуются с данными работы [11], но среднеквадратические отклонения превышают в 1,5–2 раза. Сравнение среднемесячных значений ОС водяного пара показывает очень высокий коэффициент корреляции ( $0,993 \pm 0,003$ ) и уменьшение примерно в 2 раза величин рассогласований между двумя типами измерений.

Из рис. 3 следует, что относительная разность среднедневных измерений ОС водяного пара в Петергофе и Воейково имеет тенденцию к уменьшению с ростом абсолютного значения ОС водяного пара. Естественно, что при малых значениях ОС (например, зимой) относительные отличия сильно возрастают.

### Заключение

Анализ сравнения измерений ОС водяного пара двумя методами, спектроскопическим в Петергофе и радиозондовым в Воейкове, показал следующее.

1. Несмотря на хорошую корреляцию (0,96 и более) между измерениями в Петергофе и Воейково, среднеквадратические рассогласования значительны и достигают ~20% и более для большинства подансамблей сравнений. Более жесткое временное согласование двух типов измерений, временной интервал между которыми не превышал 0,5 или 1 ч, не приводит к заметно лучшему согласию. Сильное рассогласование обусловлено, главным образом, естественной пространственной изменчивостью ОС водяного пара с учетом удаленности Петергофа от Воейково на 50 км. Эта изменчивость может достигать ~13 кг/м<sup>2</sup> (1,35 мм осадочной воды) за 1 день на расстоянии 50 км. Отметим, что близкие пространственные градиенты ОС были зарегистрированы В.В. Калининским с помощью глобальных спутниковых навигационных систем [12].

2. Сравнение среднемесячных значений ОС водяного пара показывает очень высокий коэффициент корреляции ( $0,993 \pm 0,003$ ) и уменьшение примерно в 2 раза – до величин относительных и абсолютных рассогласований в 11% ( $0,98 \text{ кг/м}^2$ ) между двумя типами измерений.

3. Приведенные результаты сопоставлений и вариации величин рассогласований, обусловленные пространственно-временными вариациями ОС водяного пара, накладывают жесткие требования на согласование двух типов измерений при валидации спутниковых измерений ОС по различным наземным измерениям.

Экспериментальные исследования проведены на аппаратуре РЦ «Геомодель» СПбГУ при частичной поддержке РФФИ (грант № 12-05-00598) и проекта

СПбГУ 11.37.28.2011, обработка и анализ данных выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00096).

1. WCRP, 2000: Assessment of upper tropospheric and stratospheric water vapour. SPARC Rep. 2, WCRP 113, WMO Tech. Doc. 1043. 312 p.
2. Buehler S.A., Ostman S., Melsheimer C., Holl G., Eliason S., John V.O., Blumenstock T., Hase F., Elgered G., Raffalski U., Nasuno T., Satoh M., Milz M., Mendrok J. A multi-instrument comparison of integrated water vapour measurements at a high latitude site // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12, N 22. P. 10925–10943. DOI: 10.5194/acp-12-10925-2012.
3. Поберовский А.В. Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 1. С. 56–58.
4. Hase F., Hammigan J.W., Coffey M.T., Goldman A., Hopfner M., Jones N.B., Rinsland C.P., Wood S.W. Inter-comparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution, ground-based FTIR measurements // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2004. V. 87, N 1. P. 25–52.
5. URL: <http://www.nasa.gov/centers/goddard/missions/index.html>
6. URL: [http://www.cesm.ucar.edu/working\\_groups/WACCM/](http://www.cesm.ucar.edu/working_groups/WACCM/) The Whole Atmosphere Community Climate Model
7. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.-P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacombe N., Lafferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Simeckova M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Auwera J.V. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2009. V. 110, N 9. P. 533–572.
8. Schneider M., Hase F., Blumenstock T. Water vapour profiles by ground-based FTIR spectroscopy: Study for an optimised retrieval and its validation // Atmos. Chem. Phys. 2006. V. 6, N 3. P. 811–830.
9. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
10. Фридзон М.Б., Ермошенко Ю.М. Радиозондирование атмосферы // Мир измерений. 2009. № 7. URL: <http://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=30717>
11. Van Malderen R., Brenot H., Pottiaux E., Mies K., Beirle S., Wagner T., Hermans C., De Maziure M., De Backer H., Bruyminx C. Inter-technique comparison of integrated water vapour measurements for climate change analysis // European Geoscience Union General Assembly. 2012, Vienna, 22–27 April 2012.
12. Калининков В.В. Восстановление интегрального влагосодержания атмосферы с помощью глобальных навигационных спутниковых систем: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Казань, 2013. 18 с.

#### A.O. Semenov, Ya.A. Virolainen, Yu.M. Timofeyev, A.V. Poberovsky. Comparison of ground-based IR spectrometer and radio sounding total column water vapor measurements.

We compared two datasets of total column water vapor measurements near St. Petersburg (obtained in 2009–2012): ground-based IR spectrometer measurements at Peterhof station and radio sounding measurements at Voeikovo station. Despite a good correlation of daily measurements in Peterhof and Voeikovo, RMS mismatch is significant, reaching 20% or more for most subsets taken for the comparison. Strong mismatch is, mainly, due to the natural spatial variability of total water vapor content, accounting for the 50 km distance between Peterhof and Voeikovo. This variability needs to be considered in validating the satellite measurements of water vapor content by ground-based measurements.