

Влияние пространственного согласования на результаты сопоставления наземных и спутниковых измерений общего влагосодержания

И.А. Березин, Ю.М. Тимофеев, Я.А. Виролайнен, А.В. Поляков, Н.А. Зайцев

*Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 198504, Россия
E-mail: yana.virolainen@spbu.ru*

Мониторинг общего содержания водяного пара (ОСВП) – важнейшего парникового газа в земной атмосфере – проводится различными спутниковыми методами. Для контроля точности спутниковые измерения постоянно валидируются на сети наземных измерительных станций. Мы сопоставили измерения ОСВП, осуществленные спутниковым прибором AMSU и наземным микроволновым (МКВ) радиометром RPG-HATPRO в окрестностях Санкт-Петербурга в период с марта 2013 г. по май 2014 г. Особое внимание при сравнениях было уделено влиянию пространственного согласования двух типов измерений. Минимальные рассогласования между наземными и спутниковыми измерениями, как абсолютные, так и относительные, наблюдаются при минимальном пространственном рассогласовании двух типов измерений (0–90 км). Кроме того, при увеличении пространственного рассогласования уменьшается коэффициент корреляции между двумя типами измерений. Анализ проведенных ранее сопоставлений спутниковых МКВ измерений ОСВП с независимыми измерениями показал, что максимальное согласие измерений наблюдается над водной поверхностью. Это объясняется высокой точностью современных параметризаций МКВ излучательной способности водной поверхности и определением ее значений из самих измерений уходящего МКВ излучения.

Ключевые слова: сравнения дистанционных измерений, общее содержание водяного пара, спутниковый МКВ радиометр AMSU, наземный МКВ радиометр RPG-HATPRO

*Одобрена к печати: 11.07.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-149-156*

Введение

Водяной пар играет важную роль в формировании погоды и климата на планете. Для оценки точности измерений необходимо проводить сравнения и взаимную калибровку различных методов и приборов (Monitoring Atmospheric..., 2013). Сопоставление измерений общего содержания водяного пара (ОСВП) спутниковым прибором AMSU и наземным микроволновым (МКВ) радиометром RPG-HATPRO было проведено в окрестностях Санкт-Петербурга (Петергоф) в период с 13 марта 2013 г. по 31 мая 2014 г. В статье приведены результаты этих сопоставлений при различном пространственном согласовании двух типов измерений.

Измерения общего содержания водяного пара

МКВ радиометр RPG HATPRO (Radiometer Physics GmbH – Humidity And Temperature PROfiler) производства немецкой компании Radiometer Physics GmbH (Rose, Czekala, 2005) 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 водозапаса облаков. Радиометр установлен на вышке на крыше здания НИИ физики СПбГУ (географические координаты

наты 59°53' с.ш., 29°50' в.д.). Радиометр проходит регулярную абсолютную калибровку в соответствии с требованиями к эксплуатации. ОСВП определяется прибором с абсолютной погрешностью $\pm 0,3$ мм и случайной погрешностью менее 0,05 мм (Rose, Czekała, 2005). Отметим, что малые серии аппаратуры – микроволновые профиломеры МТП-5 для измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя и радиометры МР-3000А и «Микрорадком» для тропосферных исследований изготавливаются в России (Кадыгров, 2009; Кадыгров и др., 2013) и США (Щукин и др., 2009).

На спутнике Aqua функционирует прибор AMSU, предназначенный для температурно-влажностного зондирования атмосферы. Стандартными выходными данными прибора AMSU являются вертикальные профили температуры, геопотенциальные высоты, излучательная способность поверхности, ОСВП и водозапас облаков (Grody et al., 2001). Пространственное разрешение спутниковых измерений в надир составляет ~ 50 км. Программы валидации результатов интерпретации измерений прибора AMSU (версия 5) дали следующие оценки погрешности определения ОСВП: 5% для океанов и широт до 50° и 5–20% для суши (за исключением полярных районов) (AIRS/AMSU/HSB..., 2007).

Результаты сопоставлений

Для сравнений из всего массива спутниковых измерений были отобраны качественные измерения (индекс качества totH2OMWOnlyStd_QC=1 (AIRS/AMSU/HSB..., 2014)), осуществлённые в Ленинградской области, всего ~ 6200 измерений. Для каждого измерения были подобраны соответствующие измерения прибором НАТПРО (Петергоф), осреднённые и согласованные по времени в интервале ± 2 секунды. Из всего ансамбля сопоставлений (~ 3600 сопоставлений) было выделено 5 подансамблей: измерения с пространственной рассогласованностью 0–60 км, 60–90 км, 90–120 км, 120–150 км и 150–200 км.

Для примера на *рис. 1* представлены ОСВП по данным AMSU и НАТПРО и их относительные разности при минимальном расстоянии между наземными и спутниковыми измерениями (0–60 км). Относительная разность между AMSU и НАТПРО измерениями меняется от 0% до 80%. При этом 46% процентов всех разностей меньше 10%, а 73% всех разностей меньше 20%. На *рис. 2* изображены гистограммы распределения общего количества измерений для двух расстояний между центрами измерениями (0–60 км и 90–120 км), для которых относительная разность попадала в соответствующий интервал с шагом 5%. Существенного смещения гистограмм при росте удаления не наблюдается.

В *табл. 1* приведены абсолютные и относительные характеристики рассогласований между спутниковыми и наземными измерениями ОСВП для различных удалений центров измерений друг от друга (AMSU – НАТПРО).

Как видно из *табл. 1*, минимальные рассогласования, как абсолютные, так и относительные, наблюдаются при минимальном пространственном рассогласовании двух типов измерений (0–90 км). СКО находятся в диапазоне от 2,8 до 3,7 мм (17,6–24,5%), смещение –

от -0,77 мм до 0,24 мм (0,6–5,1%). Кроме того, при увеличении рассогласований уменьшается коэффициент корреляции между наземными и спутниковыми измерениями.

Таблица 1. Характеристики рассогласования для всех подансамблей сопоставлений, СКО – среднеквадратичные отклонения, СО – средние отклонения, R здесь и далее – коэффициент корреляции, N – число измерений

Удаление, км	N	СКО, мм (%)	СО, мм (%)	R
0–60	133	2,9 (17,8)	0,24 (1,4)	0,94±0,01
60–90	484	2,8 (17,6)	-0,10 (-0,6)	0,935±0,006
90–120	980	3,1 (21,0)	-0,44 (-2,9)	0,924±0,005
120–150	871	3,2 (21,6)	-0,63 (-4,2)	0,925±0,005
150–200	1108	3,7 (24,5)	-0,77 (-5,1)	0,901±0,006

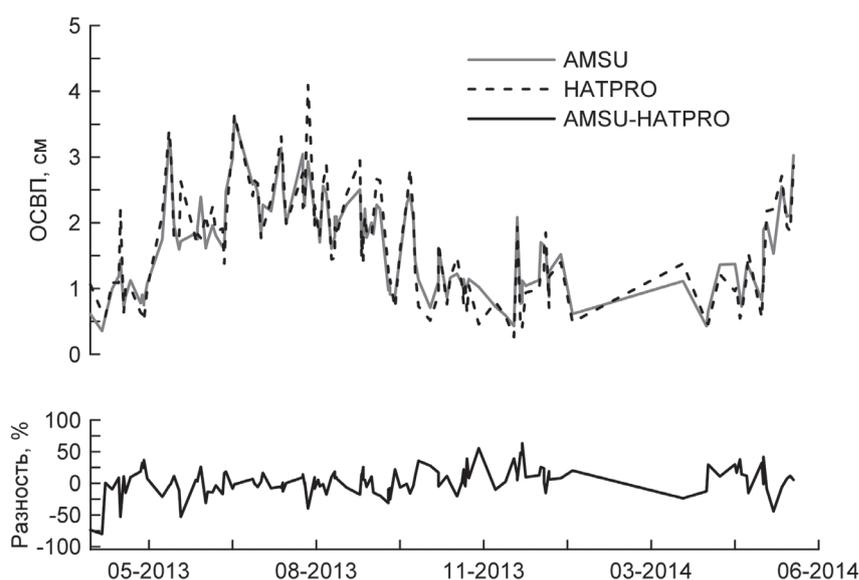


Рис. 1. Временной ход ОСВП, измеренный в районе Санкт-Петербурга приборами AMSU и RPG-HATPRO, а также их относительная разность при пространственном рассогласовании 0–60 км

Анализ линейной регрессии для всех рассмотренных удалений спутниковых и наземных измерений показал (табл. 2), что с увеличением удаления двух типов измерений наклон регрессии мало меняется, а смещение ведет себя не монотонно. Как правило, МКВ наземные измерения дают больший диапазон вариаций ОСВП, а AMSU в среднем занижает ОСВП по сравнению с измерениями RPG HATPRO.

Таблица 2. Параметры регрессии между наземными и спутниковыми измерениями ОСВП

Удаление, км	Сдвиг	Наклон
0–60	0,32±0,05	0,82±0,03
60–90	0,24±0,03	0,85±0,01
90–120	0,24±0,02	0,82±0,01
120–150	0,23±0,02	0,81±0,01
150–200	0,27±0,02	0,78±0,01

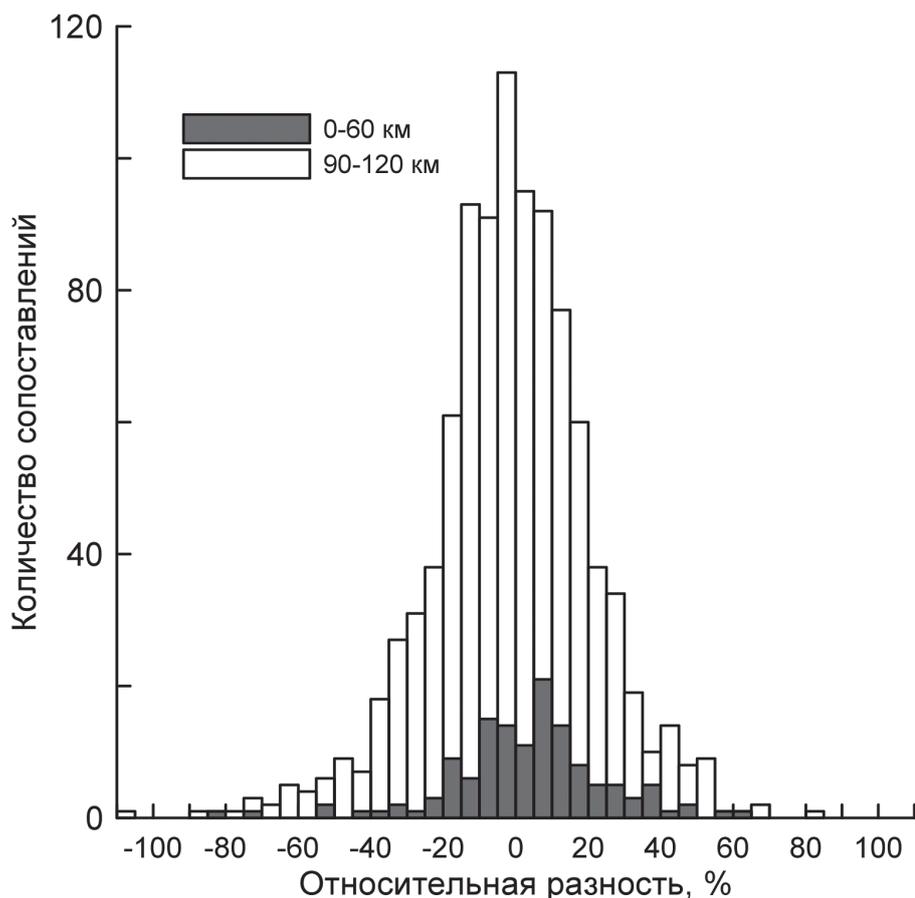


Рис. 2. Распределение относительных разностей AMSU - HATPRO измерений ОСВП для двух диапазонов пространственных рассогласований: 0–60 км и 90–120 км

Обсуждение результатов

Погрешности спутниковых измерений ОСВП зависят от многих факторов – от характеристик спутниковой аппаратуры (например, используемой линии поглощения водяного пара, уровня шума измерений), самих величин ОСВП, характера подстилающей поверхности, района измерений и т.д.

Таблица 3. Примеры сравнения спутниковых МКВ измерений ОСВП с независимыми измерениями

<i>Сравниваемые приборы</i>	<i>СО / СКО</i>	<i>R</i>	<i>Примечания</i>	<i>Литература</i>
AMSU (NOAA-15) и радиозонды	1±3 мм		Диапазон ОСВП: 5–60 мм	(Grody et al., 2001)
SSM/I	3,8 мм (безоблачные), 4,9 мм (облачные)		Расчетные оценки для суши	(Aires et al., 2001)
AMSU (NOAA-15) и GPS измерения	(-1,7±1,2) мм / (0,74–1,3) мм	0,47–0,86	6 станций в Антарктиде, ОСВП от 1–8 мм	(Vey et al., 2004)

AMSU (AQUA) и независимые измерения	5% (океаны до 50°), 5–20% (суша), 10% (суша, полярные районы)		Версия 5 обработки измерений	(AIRS/AMSU/HSB..., 2007)
AMSU (NOAA-16) и радиозонды	0,21±2,03 мм		ОСВП: (15–75) мм	(Singh, Bhatia, 2008)
SSM/I и AMSR-E и радиозонды	0,11±(0,90–1,09) мм	0,91	Водная поверхность, 3 островные станции радиозондирования	(Bobilev et al., 2010)
AMSR-E и GPS	0,45±6,35 мм		суша	(Deeter, 2007)
AMSR-E и GPS	/ (4,20–4,85) мм	0,94	суша	(Ji, Shi, 2014)
AMSR-E – AIRS AMSR-E – GPS	/ (4,4–5,6) мм / 4,7 мм	0,80	суша	(Du et al., 2015)
AMSU (NOAA-16) – GPS	(0,19±1,05) мм (-2,3±19,6)%	0,84	суша	(Кадыгров и др., 2013)
AMSU (NOAA-17) – GPS	(0,06±0,97) мм (-1,6±19,0)%	0,86		

В табл. 3 приведены типичные примеры сопоставлений спутниковых измерений ОСВП с независимыми измерениями. Отличия в значениях ОСВП сильно варьируются для различных условий сравнений. Так, СКО меняется от 0,74 мм до 6,3 мм, СО – от 0,06 мм до 1,7 мм. Также сильно отличаются коэффициенты корреляции между различными типами измерений: от 0,47 до 0,94. Наилучшее согласие спутниковых измерений с независимыми измерениями наблюдается над водной поверхностью. Это объясняется высокой точностью современных параметризаций МКВ излучательной способности водной поверхности и определением ее значений из самих измерений уходящего МКВ излучения. Так, малые СО (0,11–0,21) мм и малые СКО (0,9–2,03) мм были получены для методик, использованных в работах (Bobilev et al., 2010; Deeter, 2007) для водных поверхностей. Для суши точность существенно хуже, что обусловлено погрешностями задания ее излучательной способности, и она сильно варьируется. Систематические погрешности, как правило, невелики (-0,19–0,45) мм, но СКО достигают значений 5,6 мм и 6,35 мм соответственно. Наши сопоставления вблизи Санкт-Петербурга также показывают относительно малые систематические отличия между спутниковыми и наземными МКВ измерениями ОСВП – 0,10–0,77 мм (0,6–5,1%). Среднеквадратические отличия составляют 2,8–3,7 мм. В относительных величинах это составляет ~ 18–25%, что близко к суммарным погрешностям двух типов МКВ измерений ОСВП над сушей.

Заключение

В работе сопоставлены измерения ОСВП, осуществленные спутниковым прибором AMSU и наземным МКВ радиометром RPG-НАТPRO в окрестностях Санкт-Петербурга в период с марта 2013 г. по май 2014 г. Для сравнений использовались измерения спутникового прибора AMSU (высокого качества), удаленные на различные расстояния от наземных

измерений, но не более 200 км от измерений МКВ радиометра. Временное рассогласование составляло менее двух часов. Сравнения показали:

1. Минимальные рассогласования между наземными и спутниковыми измерениями, как абсолютные, так и относительные, наблюдаются при минимальном пространственном рассогласовании двух типов измерений (0–90 км). Кроме того, при увеличении рассогласований уменьшается коэффициент корреляции между двумя типами измерений.
2. Наблюдается слабая зависимость характеристик отличий между наземными и спутниковыми измерениями от величин пространственного рассогласования измерений в исследованном диапазоне (0–200 км). Наши сопоставления вблизи Санкт-Петербурга показывают относительно малые СО между спутниковыми и наземными МКВ измерениями ОСВП (не более 5%), а СКО составляют 18–25%.
3. Анализ проведенных ранее сопоставлений спутниковых МКВ измерений ОСВП с независимыми измерениями показал, что минимальные отличия измерений наблюдаются над водной поверхностью. Это объясняется высокой точностью современных параметризаций МКВ излучательной способности водной поверхности и определением ее значений из самих измерений уходящего излучения. Наши сопоставления в Петергофе показывают, что отличия спутниковых и наземных измерений близки к суммарным погрешностям двух типов измерений.

Экспериментальные исследования проведены на аппаратуре РЦ «Геомодель» СПбГУ при финансовой поддержке грантов РФФИ 15-05-07524 и 16-05-00681. Обработка и анализ всех данных выполнены за счет финансирования по гранту Российского научного фонда №14-17-00096.

Литература

1. *Кадыгров Е.Н.* Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя-метод, аппаратура, результаты измерений // *Оптика атмосферы и океана*. 2009. Т. 22. № 7. С. 697–704.
2. *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 атмосферы и океана*. 2013. Т. 26. № 6. С. 459–465.
3. *Щукин 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.
4. *Aires F., Prigent C., Rossow W.B., Rothstein M.* A new neural network approach including first guess for retrieval of atmospheric water vapor, cloud liquid water path, surface temperature, and emissivities over land from satellite microwave observations // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. No. D14. P. 14887–14907.
5. AIRS/AMSU/HSB Version 6 Level 2 Product User Guide. Version 1.1. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2014. 139 p.
6. AIRS/AMSU/HSB Version 5 CalVal Status Summary. Version 1.0. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2007. 17 p.
7. *Bobylev L.P., Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Mitnik M.L.* Atmospheric Water Vapor and Cloud Liquid Water retrieval Over the Arctic Ocean Using Satellite Passive Microwave Sensing // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2010. V. 48. No. 1. P. 283–294.
8. *Deeter M.D.* A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. P. L02815
9. *Du J., Kimball J.S., Jones L.A.* Satellite Microwave Retrieval of Total Precipitable Water Vapor and Surface Air Temperature Over Land From AMSR2 // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53. No. 5. P. 2520–2531.

10. Grody N., Zhao J., Fe R. Determination of precipitable water and cloud liquid water over oceans from the NOAA 15 advanced microwave sounding unit // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. No. D3. P. 2943–2953.
11. Ji D., Shi J. Water Vapor Retrieval Over Cloud Cover Area on Land Using AMSR-E and MODIS // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2014. V. 7. No. 7. P. 3105–3116.
12. Monitoring Atmospheric Water Vapour Ground-Based Remote Sensing and In-situ Methods Series: ISSI Scientific Report Series. Vol. 10. Heidelberg: Springer Verlag, 2013. 326 p.
13. Rose Th., Czekala H. Accurate Atmospheric Profiling with the RPG-HATPRO Humidity – and Temperature Profiler // RPG, Meckenheim, Germany, 2005. 20 p.
14. Singh D., Bhatia R.C. Development of a neural network algorithm for the retrieval of TPW from NOAA16 AMSU measurements // *Int. J. Rem. Sensing*. 2008. V. 29. No. 14. P. 4045–4060.
15. Vey S., Dietrich R., Johnsen K.-P., Miao J., Heygster G. Comparison of Tropospheric Water Vapour over Antarctica Derived from AMSU-B Data, Ground-Based GPS Data and the NCEP/NCAR Reanalysis // *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 2004. V. 82. No. 1B. P. 259–267.

The influence of spatial matching on the results of the comparison of integrated water vapor ground-based and satellite measurements

I.A. Berezin, Yu.M. Timofeyev, Ya.A. Virolainen, A.V. Polyakov, N.A. Zaitsev

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg 198504, Russia
E-mail: yana.virolainen@spbu.ru

A great number of satellites monitor integrated water vapor (IWV) – the most important greenhouse gas in the Earth’s atmosphere. We compare measurements of IWV by the satellite AMSU device and the ground-based microwave (MW) RPG-HATPRO radiometer in the vicinity of St. Petersburg (Peterhof) in the period between March 2013 and May 2014. Especially, we analyze the influence of spatial matching of two types of measurements. The minimal differences between ground-based and satellite measurements, both absolute, and relative, are observed at the minimal spatial mismatches (0–90 km). Moreover, the correlation coefficient between the two types of measurements decreases with the increase of spatial differences. The analysis of previous comparisons of IWV satellite MW measurements with independent data shows that the highest agreement of measurements is observed over the water surface. We explain this by the high accuracy of current parameterizations of MW water surface emissivity and the retrieval of its values from satellite measurement data.

Keywords: comparison of remote sensing methods, integrated water vapor, AMSU, RPG-HATPRO

Accepted: 11.07.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-149-156

References

1. Kadygrov E.N. Mikrovolnovaya radiometriya atmosfernogo pograničnogo sloya-metod, apparatura, rezul'taty izmerenii (Microwave radiometry of atmospheric boundary layer – method, device, results), *Optika atmosfery i okeana*, 2009, Vol. 22, No. 7, pp. 697–704.
2. Kadygrov E.N., Gorelik A.G., Miller E.A., Nekrasov V.V., Troitskii A.V., Tochilkina T.A., Shaposhnikov A.N.. Rezul'taty monitoringa termodinamicheskogo sostoyaniya troposfery mnogokanal'nym mikrovolnovym radiometricheskim kompleksom (The results of monitoring of thermodynamic state of troposphere by microwave radiometric complex), *Optika atmosfery i okeana*, 2013, Vol. 26, No. 6, pp. 459–465.
3. Shchukin G.G., Stepanenko V.D., Obratsov S.P., Karavaev D.M., Zhukov V.Yu., Rybakov Yu.V. Sostoyanie i perspektivy radiofizicheskikh issledovaniy atmosfery i podstilayushchei poverkhnosti (The state of art and perspective of radio-physical study of atmosphere and surface), *Trudy GGO*, 2009, No. 560, pp. 143–167.
4. Aires F., Prigent C., Rossow W.B., Rothstein M. A new neural network approach including first guess for retrieval of atmospheric water vapor, cloud liquid water path, surface temperature, and emissivities over land from satellite microwave observations, *J. Geophys. Res.*, 2001, Vol. 106, No. D14, pp. 14887–14907.
5. AIRS/AMSU/HSB Version 6 Level 2 Product User Guide, Version 1.1, Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2014, 139 p.
6. AIRS/AMSU/HSB Version 5 CalVal Status Summary, Version 1.0, Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2007, 17 p.
7. Bobylev L.P., Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Mitnik M.L. Atmospheric Water Vapor and Cloud Liquid Water retrieval Over the Arctic Ocean Using Satellite Passive Microwave Sensing, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, Vol. 48, No. 1, pp. 283–294.

8. Deeter M.D. A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 2007, Vol. 34, pp. L02815.
9. Du J., Kimball J.S., Jones L.A. Satellite Microwave Retrieval of Total Precipitable Water Vapor and Surface Air Temperature Over Land From AMSR2, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, No. 5, pp. 2520–2531.
10. Grody N., Zhao J., Fe R. Determination of precipitable water and cloud liquid water over oceans from the NOAA 15 advanced microwave sounding unit, *J. Geophys. Res.*, 2001, Vol. 106, No. D3, pp. 2943–2953.
11. Ji D., Shi J. Water Vapor Retrieval Over Cloud Cover Area on Land Using AMSR-E and MODIS, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 3105–3116.
12. Monitoring Atmospheric Water Vapour Ground-Based Remote Sensing and In-situ Methods Series: ISSI Scientific Report Series, Vol. 10, Heidelberg: Springer Verlag, 2013, 326 p.
13. Rose Th., Czekala H. *Accurate Atmospheric Profiling with the RPG-HATPRO Humidity – and Temperature Profiler*, RPG, Meckenheim, Germany, 2005. 20 p.
14. Singh D., Bhatia R.C. Development of a neural network algorithm for the retrieval of TPW from NOAA16 AMSU measurements, *Int. J. Rem. Sensing*, 2008, Vol. 29, No. 14, pp. 4045–4060.
15. Vey S., Dietrich R., Johnsen K.-P., Miao J., Heygster G. Comparison of Tropospheric Water Vapour over Antarctica Derived from AMSU-B Data, Ground-Based GPS Data and the NCEP/NCAR Reanalysis, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, Vol. 82, No. 1B, pp. 259–267.