

Валидация информационных продуктов спутниковых радиометров микроволнового диапазона

Д.М. Караваев¹, Ю.В. Кулешов¹, А.Б. Успенский², Г.Г. Щукин¹

¹*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, С-Петербург, Россия*

E-mail: dm.karavaev@mail.ru

²*НИИЦ "Планета", Москва, Россия*

E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

Рассмотрены вопросы валидации спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы. Обсуждаются сравнительные характеристики современных спутниковых микроволновых радиометров (SSMIS, ATMS, AMSU, AMSR2, MTB3A), предназначенных для получения информации о параметрах атмосферы и подстилающей поверхности. Изложены методические аспекты оперативного определения влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков, профилей температуры и влажности атмосферы с помощью наземных микроволновых радиометров. Проанализированы результаты сравнения данных спутникового температурно-влажностного зондирования атмосферы с данными аэрологического и наземного микроволнового зондирования атмосферы. В частности, установлено, что для Северо-Западного и Западно-Сибирского регионов России, на высотных уровнях 300 - 850 гПа, погрешность определения температуры атмосферы по спутниковым данным ATOVS составляет 1,3 - 2,3 К, а относительная погрешность определения удельной влажности составляет около 15 - 30 %. Показано согласие данных SSMI по влагозапасу атмосферы над океаном с данными судового микроволнового радиометра (22 ГГц и 36 ГГц). Судовые радиометрические измерения влагозапаса атмосферы также хорошо согласуются с данными синхронного аэрологического зондирования (СКО между данными радиометра и радиозонда составляет 2 кг/м²). Обсуждаются проблемы оснащения полигонов измерительными комплексами для валидации спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы, а также перспективы использования полигона Лехтуси (Ленинградская область) для валидации информационных продуктов, получаемых по данным микроволнового радиометра (MTB3A) и радиолокатора (БРЛК) КА «Метеор-М».

Ключевые слова: микроволновый радиометр, радиояркость температура, профиль температуры атмосферы, профиль влажности атмосферы, влагозапас атмосферы, водозапас облаков, валидация.

Введение

В интересах оперативной гидрометеорологии актуальной для использования представляется информация отечественного микроволнового радиометра MTB3A-ГЯ КА "Метеор-1М". Создание отечественных космических комплексов дистанционного зондирования земли должно включать организацию и проведение специальных программ валидации, опирающихся на национальную систему комплексов подспутниковых наблюдений и тестовых полигонов. Основные задачи программы валидации включают широкий круг вопросов, в том числе, проверку функционирования бортовой аппаратуры, настройку комплексов предварительной и тематической обработки данных в период целевого использования аппаратуры, обеспечение сертификации информационных продуктов по различным показателям качества.

Валидация информационных продуктов, как показывает мировой опыт, выполняется путем сопоставления результатов определения геофизических параметров по спутниковым

данным с независимыми данными других систем наблюдения. В частности, для валидации данных температурно-влажностного зондирования атмосферы МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» целесообразно использовать результаты сетевого аэрологического зондирования атмосферы, данные авиационного зондирования с прототипами спутниковой аппаратуры, а также, данные наземных измерений с использованием тестовых полигонов, организованных в различных регионах России. Полигоны должны оснащаться специальными наземными комплексами для измерения параметров атмосферы и поверхности. Преимущества применения микроволновых радиометров в составе наземных измерительных комплексов в период валидационных экспериментов связаны с возможностью производства непрерывных измерений метеопараметров атмосферы при практически любых погодных условиях.

Спутниковые системы и их информативность

Среди перечня информационных продуктов МТВЗА-ГЯ рассматриваются радиояр-
костные температуры (29 каналов в диапазоне 10,6-183,3 ГГц), а также определяемые геофизические параметры: профили температуры и влажности атмосферы, влагозапас атмосферы и водозапас облаков (над океаном) и другие. Для валидации информационных продуктов МТВЗА-ГЯ перспективно рассматривать в первую очередь данные современных радиометров AMSR2/GCOM-W1 (по параметрам подстилающей поверхности, по влагозапасу атмосферы и водозапасу облаков) и ATMS/Suomi NPP (по данным температурно-влажностного зондирования атмосферы). В валидационных экспериментах в настоящее время также актуальны для использования данные спутниковых микроволновых радиометров SSMIS/DSMP, AMSU-A,-B /NOAA, MetOp (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительные характеристики спутниковых радиометров температурно-влажностного зондирования атмосферы

Параметры	SSMIS	AMSU-A,B	ATMS	AMSR2	MTB3A
Частота, ГГц	- - 19,35 (V,H) 22,235 (V) 37,0 (V,H) 50,3-59,4 (H,rC) 60,79-63,28 (rC) 91,65 (V,H) 150 (H) 183,3 ±1;3;6,6(H) -	- - - 23,8 (V) 31,4 (V) 50,3-57,29 (V,H) - 89,0 (V) 150,0 (V) 183,3 ±1;3;7(V) -	- - - 23,8(qV) 31,40(qV) 50,3-57,3(qH) - 88,2 (qV) 165,5 (qV) 183,3 ±1;3;7(qH) 183,3 ±1,8;4,5(qH)	6,93/7,3 (V,H) 10,65 (V,H) 18,7(V,H) 23,8(V,H) 36,5(V,H) - - 89(V,H) - - -	- 10,6 (V,H) 18,7 (V,H) 23,8 (V) 31,5-48(V,H) 52,8-57,29 (V) - 91,65 (V,H) - 183,3 ±1; 3;7(V) -
Число каналов	24	20	22	12	29
Сканирование	коническое	линейное	линейное	коническое	коническое
Полоса, км	1707	2200	2600	1450	1600

Исследования информативности данных спутниковых микроволновых радиометров МТВЗА-ГЯ, AMSU-A,-В на основе моделирования переноса радиотеплового излучения системы атмосфера-подстилающая поверхность (Образцов, Щукин, 2004) показали, что погрешность восстановления метеопараметров атмосферы, зависит от типа подстилающей поверхности и наличия облачности (в основном, в нижней тропосфере). Возможности таких радиометров как AMSU, МТВЗА-ГЯ для получения данных о профилях температуры и влажности атмосферы близки. Применительно к радиометру ATMS можно отметить, что использование дополнительных частотных каналов вблизи центра линии поглощения водяного пара 183,3 ГГц должно повысить информативность влажностного зондирования в тропосфере. Кроме того, при создании ATMS улучшена система абсолютной калибровки радиометров (погрешность абсолютных измерений радиоярких температур составляет 0,6 К), что позволит отказаться от процедур «внешней» калибровки по естественным источникам излучения. Для проверки качества абсолютной калибровки радиометров типа ATMS важны подспутниковые эксперименты с самолетным прототипом спутникового радиометра (Blackwell et al., 2001).

Сравнительные эксперименты и их результаты

Наземные микроволновые радиометры в задачах валидации

При решении задач температурно-влажностного зондирования атмосферы с наземных радиометров используются участки спектра частот вблизи центров линий поглощения водяного пара (22,235 ГГц и 183,31 ГГц) и кислорода (60 ГГц), а также измерения в «окнах прозрачности» атмосферы 30-38 ГГц, 75-95 ГГц (Степаненко, Щукин, 1987). Для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков обычно применяется схема двухчастотного зондирования вблизи центра линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц (Степаненко, Щукин, 1987; Караваев, 2004). Тогда влагозапас атмосферы (Q) и водозапас облаков (W) определяются на основе регрессионных соотношений:

$$\begin{aligned} Q &= a_0 + a_1 \tau(\nu_1) + a_2 \tau(\nu_2), \\ W &= b_0 + b_1 \tau(\nu_1) + b_2 \tau(\nu_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где a_i , b_j – коэффициенты регрессии; $\tau(\nu_k)$ – оптическая толщина атмосферы на частоте ν_k . Оптическая толщина атмосферы связана с измеряемой радиояркой температурой $T_b(\nu_k)$ соотношением:

$$\tau(\nu_k) = \ln \left[\frac{T_{ef}(\nu_k) - T_c}{T_{ef}(\nu_k) - T_b(\nu_k)} \right], \quad (2)$$

где T_c – температура излучения космоса (космического микроволнового фонового излучения), 2,75 К; $T_{ef}(\nu_k)$ – средняя эффективная температура атмосферы. Основные технические характеристики радиометра для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков следующие: центральные частоты $\nu_1 = 23,8$ ГГц, $\nu_2 = 37,0$ ГГц; полоса усиления 250 МГц (при 23,8 ГГц) и 1000 МГц (при 37,0 ГГц), ширина луча (по уровню 3 дБ) 4 - 7°, уровень боковых лепестков менее минус 30 дБ, флуктуационная чувствительность около $0,1 \text{ Кс}^{-0.5}$, погрешность измерения радиоярких температур 0,5 - 1 К, темп сбора данных 1 минута. Наземный радиометр позволяет определять влагозапас атмосферы с погрешностью 0,5 - 1 кг/м², водозапас облаков - с погрешностью 0,03-0,05 кг/м².

Радиометрический метод позволяет определять профили влажности, температуры атмосферы, водности облаков в тропосфере (0 - 10 км) из результатов измерений характеристик нисходящего радиотеплового излучения атмосферы в микроволновом диапазоне. Для решения обратной задачи комплексного температурно-влажностного зондирования атмосферы часто используется метод статистической регуляризации, который дает решение $\hat{X}$ в следующем виде:

$$(\hat{X} - X_0) = (A^T I^{-1} A + K^{-1})^{-1} A^T I^{-1} (Y - AX_0), \quad (3)$$

где A - линейный оператор прямой задачи; I - ковариационная матрица ошибок измерений; K - ковариационная матрица искомых параметров; Y - вектор измеряемых параметров; X_0 - вектор оцениваемых параметров (его среднее климатическое значение). Вектор измеряемых параметров включает измеряемые значения радиоярких температур атмосферы в диапазоне частот 18 - 90 ГГц, приземные метеопараметры (влажность, температура воздуха) и другую текущую метеорологическую информацию (высота границ облачности, температура нижней границы облачности и др.). Погрешность определения температуры воздуха составляет 0,5 К (при высотах 0 - 1 км), 2,5 К (при высотах 5 - 10 км), погрешность определения относительной влажности составляет 10 - 20%. В настоящее время наиболее известны разработки микроволновых радиометров температурно-влажностного зондирования атмосферы МР - 3000А (Radiometrics Corporation, США) и НАТPRO (Radiometer Physics GmbH, Германия). Из отечественных разработок отметим создание многоканального микроволнового радиометрического комплекса «Микрорад-ком», см. (Кадыгров и др., 2013).

Сравнение данных спутниковых и наземных радиометров

Большое значение для валидации спутниковых данных микроволновых радиометров имеют подспутниковые эксперименты над акваториями океанов. Известно, что спутниковый радиометр SSMI/DMSP используется с 1987 г. и позволяет определять влагозапас атмосферы и водозапас облаков над океаном. Ниже приводятся некоторые результаты сравнения спутниковых и судовых наблюдений атмосферы над океаном, которые были выполнены в период комплексного эксперимента «АТЛАНТЭКС-90» для района Ньюфаундлендской зоны Атлантического океана. Непрерывные микроволновые радиометрические измерения выполнялись на частотах 21,0 ГГц и 36,2 ГГц с борта научно-исследовательского судна погоды (НИСП) «Волна» в период стационарной фазы эксперимента (координаты тестового полигона 48° с.ш., 46° в.д.). В качестве примера на *рис. 1* показаны три фрагмента спутниковых карт влагозапаса атмосферы по данным SSMI/DMSP F8, полученные в период с 16 по 18 апреля 1990 г. На *рис. 2* приводится временной ход влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, полученный в тот же период времени по данным судового микроволнового радиометра. Из *рисунка* следует, что значительные изменения влагозапаса атмосферы (от 5 кг/м² до 35 кг/м²) были зафиксированы около 00 ч. Гр. 17 апреля, когда судовые наблюдения проводились в области атмосферного фронта циклона. Установлено, что спутниковые и судовые радиометрические измерения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков качественно согласуются. Судовые радиометрические измерения влагозапаса атмосферы также согласуются с данными синхронного аэрологического зондирования, среднеквадратичное отклонение (СКО) между данными радиометра и радиозонда составляет 2 кг/м².

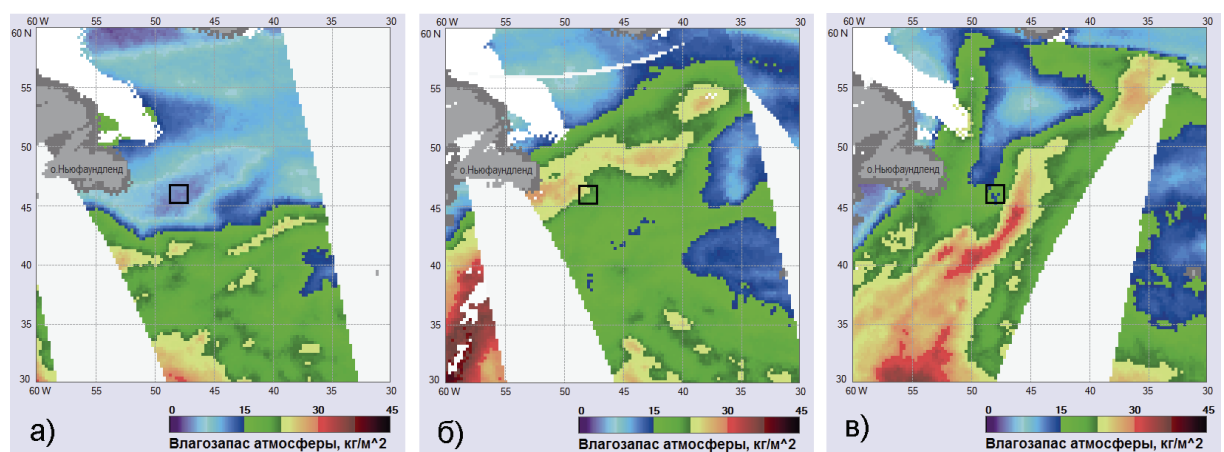


Рис. 1. Поля влагозапаса атмосферы по данным SSMI/DMSP в области тестового полигона НИСП «Волна» (на картах выделен квадратом): а) 16 апреля в 08:42 Гр.; б) 17 апреля в 08:30 Гр.; в) 18 апреля в 22:12 Гр.

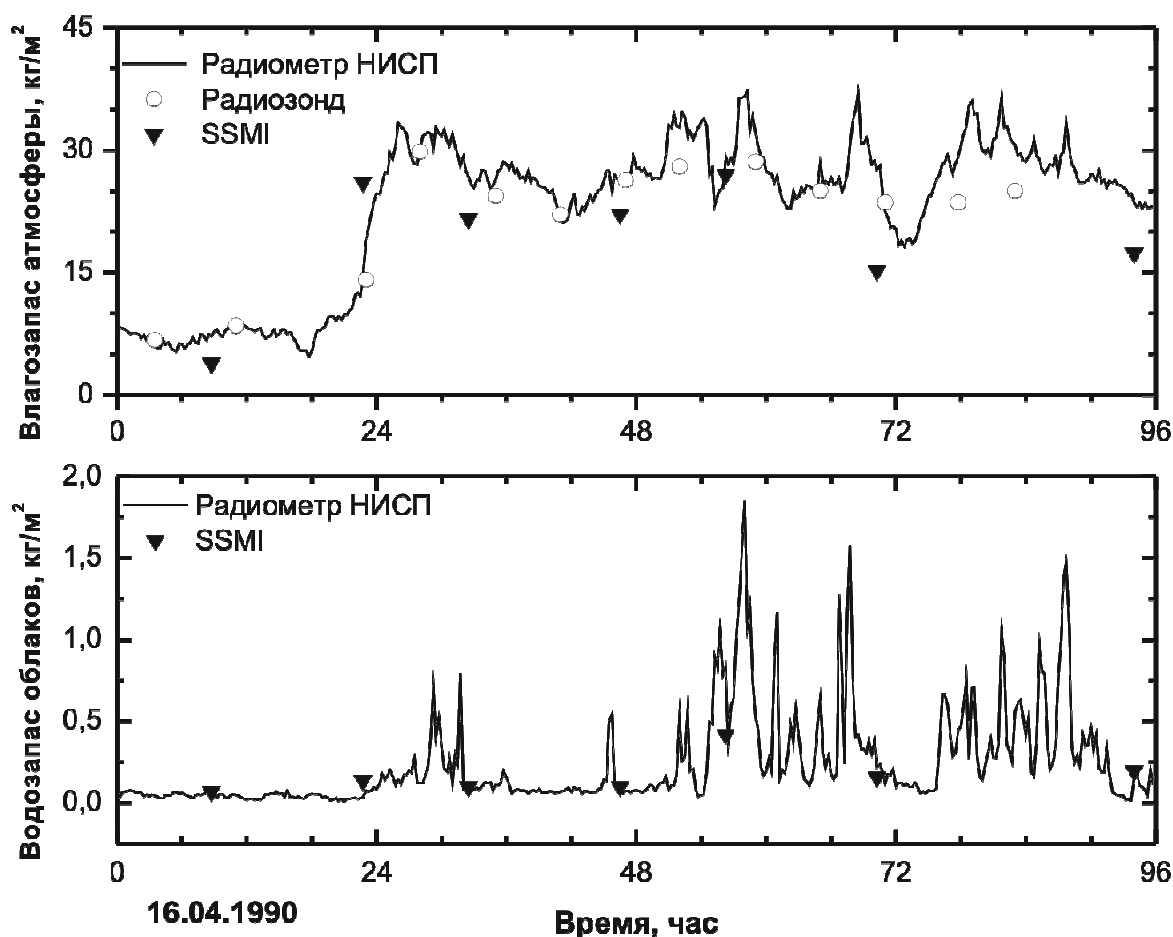


Рис. 2. Влагозапас атмосферы и водозапас облаков по данным микроволновых радиометрических измерений с борта НИСП «Волна» и результаты сравнения с данными радиозондирования и данными SSMI/DMSP

В рамках другого эксперимента проводились сравнения значений влагозапаса атмосферы спутникового радиометра ATOVS с данными наземного микроволнового радиометра 21,0 ГГц и 36,2 ГГц (Ленинградская обл., май 2008 г.), всего выборка включала 112 пар значений. Установлено, что СКО (ATOVS-наземный радиометр) составляет $2,9 \text{ кг/м}^2$, за тот же период СКО (наземный радиометр-радиозонд) составляет $1,5 \text{ кг/м}^2$ (по данным 40 выпусков радиозондов).

Сравнение с данными сети аэрологического зондирования

Для оценивания качества спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы ATOVS/NOAA выполнен ряд сравнительных экспериментов с привлечением данных сети аэрологического зондирования атмосферы Росгидромета (Щукин, Чичкова, 2013). По результатам сравнения для двух регионов России (Северо-Западного и Западно-Сибирского) сделаны следующие выводы: погрешность определения температуры воздуха составляет около 2,0 - 2,3 К на уровнях 850 - 300 гПа, увеличивается на уровне 850 - 1000 гПа до 3,0 К (в зимний период) и 4,9 К (в летний период); погрешность оп-

ределения удельной влажности на уровне 850 - 1000 гПа составляет 0,7 - 0,8 г/кг в зимний период и 1,0 - 1,7 г/кг в летний период. Относительная погрешность определения удельной влажности составляет 15 - 30%. Отмечается незначительное завышение спутниковых значений удельной влажности в приземном слое атмосферы. Такие обобщенные выводы сравнительных экспериментов согласуются с результатами валидации данных ATOVS, полученными в работе (Li et al., 2000).

Средства метеорологических измерений полигона

Наряду с принятыми полигонами системы валидационных экспериментов Росгидромета, в качестве дополнительного может быть использован полигон Лехтуси, расположенный в 40 км к северо-востоку от С-Петербурга. В состав средств метеорологических измерений полигона включены: автоматическая метеорологическая станция измерения приземных метеопараметров атмосферы; аэрологический радиопеленгационный метеорологический комплекс «Улыбка»; мобильный пункт приема спутниковой информации «Сюжет-МБ»; метеорологические радиолокаторы МРЛ-5 (длина волны 10 см, 3,2 см), «Контур-К» (длина волны 3,2 см); распределенный комплекс датчиков осадков; единая система оперативной обработки и передачи данных потребителю. Для улучшения количественного анализа полей водности конвективных облаков и интенсивности осадков перспективна модернизация пассивно-активного комплекса на базе МРЛ-5 (Щукин, 2009). Дополнительно, для валидации данных бортового радиолокационного комплекса (БРЛК) КА «Метеор-1М», на полигоне планируется разместить ряд калибровочных целей (пассивных отражателей), имеющих геодезическую привязку. Авиационные эксперименты с различными средствами дистанционного зондирования проводятся с применением самолета АН - 30.

Также в валидационных экспериментах перспективно применять самолет-лабораторию Росгидромета ЯК - 42Д, который оборудован широким набором специальных приборов (контактных и дистанционных) для контроля состояния атмосферы, облаков и подстилающей поверхности. Для валидации спутниковых данных по влагозапасу атмосферы и водозапасу облаков необходима организация островных наблюдений атмосферы (аэрологическое зондирование, микроволновые измерения), а также измерения с морских платформ.

Заключение

Статья посвящена исследованиям вопросов валидации спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы. Рассмотрены характеристики современных отечественных и зарубежных спутниковых многочастотных микроволновых радиометров. В валидационных экспериментах перспективно применение наземных микроволновых радиометров, которые позволяют оперативно определять влагозапас атмосферы, водозапас облаков, профили температуры и влажности в тропосфере. Представлены результаты выполненных сравнительных экспериментов, направленных в основном на сравнения данных спутникового температурно-влажностного зондирования атмосферы с данными сетевого аэрологического зондирования атмосферы и с данными наземных микроволновых радиометров. В частности, установлено, что по спутниковым данным ATOVS, на уровнях 300 - 850 гПа, погрешность определения температуры атмосферы составляет 1,3 - 2,3 К, а относительная погрешность определения удельной влажности составляет 15 - 30 %. Судовые микроволновые радиометрические измерения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков над океаном согласуются с данными SSMI/DMSP. Для условий Ленинградской области величина СКО при сравнении спутниковых данных ATOVS с независимыми данными наземных радиометрических оценок влагозапаса атмосферы оставляет 2,9 кг/м². Показана возможность использования полигона Лехтуси (Ленинградская область) для валидации информационных продуктов, получаемых по данным микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ и радиолокатора БРЛК КА «Метеор-М».

Литература

1. 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. 26. № 6. С. 459–465.
2. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Применение методов СВЧ-радиометрии для диагноза содержания жидкокапельной влаги в облаках // Прикладная Метеорология. 2004. Вып. 5(533). С. 99–120.
3. Образцов С.П., Щукин Г.Г. Восстановление параметров атмосферы и подстилающей поверхности по данным спутниковых наблюдений в видимом, ИК и СВЧ-диапазонах электромагнитного спектра длин волн // Прикладная метеорология. 2004. Вып. 5(533). С. 65–98.
4. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат. 1987. 283 С.
5. Щукин Г.Г., Булкин В.В. Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы. Муром: ИПЦ МИ ВлГУ. 2009. 166 С.
6. Щукин Г.Г., Чичкова Е.Ф., Караваев Д.М. Микроволновый радиометр для валидации спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 1. С. 28–31.
7. Blackwell W.J., Barrett J.W., Chen F.W., Leslie R.V., Rosenkranz P.W., Schwartz M.J., a Staelin D.H. NPOESS Aircraft Sounder Testbed-Microwave (NASt-M): Instrument description and initial flight results // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2001. Vol. 39. № 11. PP. 2444–2453.
8. Li J., Wolf W., Menzel P. Global Soundings of the Atmosphere from ATOVS Measurements: The Algorithm and Validation // Journal of Applied Meteorology. 2000. Vol. 39. Is. 8. PP. 1248–1268.

Validation of remote sensing products generated from space-based microwave radiometers data

D.M. Karavaev¹, Y.V. Kuleshov¹, A.B. Uspensky², G.G. Shchukin¹

¹*A.F. Mozhaisky Military Aerospace Academy, St.-Petersburg, Russia*

E-mail: dm.karavaev@mail.ru

²*Scientific-Research Center for Space Hydrometeorology «Planeta», Moscow, Russia*

E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

Validation issues of satellite based temperature-humidity profile retrieval are considered. The comparative characteristics of advanced satellite-based microwave radiometers (SSMIS, ATMS, AMSU, AMSR2, MTVZA) intended to obtain information about the parameters of the atmosphere and the underlying surface are presented. Methodical aspects of determining the atmospheric water vapor, cloud liquid, atmospheric temperature-humidity profiles using ground-based microwave radiometers are considered. The results of comparison of satellite based products with upper-air and ground-based microwave radiometric soundings of the atmosphere are reviewed. In particular, it was found that for the North West and the West Siberian regions of Russia, the accuracy of determining the temperature of atmosphere on satellite data ATOVS is 1,3-2,3 K at high-altitude levels of 300-850 hPa and the relative error of determination of specific humidity is around 15-30%. An agreement was demonstrated between the SSMI data water vapor of the atmosphere over the ocean and the ship-based microwave radiometer data (22 GHz and 36 GHz). Microwave radiometric measurements of water vapor are also in good agreement with the data of synchronized upper-air sounding (RMS between the data of the ship-based radiometer and the radiosonde is 2 kg/m²). The problems of test site equipment for the validation of satellite-based temperature-humidity sounding of the atmosphere and prospects of using polygon Lehtusi (Leningrad region) for the validation of information products derived from data of microwave radiometer (MTVZA) and radar (BRLK) on-board Meteor-M satellite are under discussion.

Keyword: microwave radiometer, brightness temperature, profile of temperature of atmosphere, profile of humidity of atmosphere, water vapor, cloud liquid, validation.

References

1. Kadygrov E.N., Gorelik A.G., Miller E.A., Nekrasov V.V., Troickij A.B., Tochilkina T.A., Shaposhnikov A.N., Rezul'taty monitoringa termodinamicheskogo sostoyaniya troposfery mnogokanal'nym mikrovolnovym radiometricheskim kompleksom (Results of monitoring of termodinamical condition of troposphere by multi-channel microwave radiometric complex), *Optika atmosfery i okeana*, 2013, Vol. 26, No. 6, pp. 459–465.
2. Karavaev D.M., Shchukin G.G., Primenenie metodov SVCh-radiometrii dlya diagnoza sodержaniya zhidkokapeln'noy vlagi v oblakakh (Application of microwave radiometry for diagnosis of cloud liquid water contents), *Prikladnaya Meteorologiya*, 2004, No. 5(533), pp. 99–120.
3. Obratsov S.P., Shchukin G.G., Vosstanovlenie parametrov atmosfery i podstilayushchey poverkhnosti po dannym sputnikovykh nablyudeniy v vidimom, IK i SVCh-diapazonakh elektromagnitnogo spektra dlin voln (Determination of parameters of atmosphere and surface on based data of space observations in visible, infrared and microwave ranges of wavelength), *Prikladnaya meteorologiya*, 2004, No. 5(553), pp. 65–98.
4. Stepanenko V.D., Shchukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Yu., *Radioteplokatsiya v meteorologii (Microwave radiometry in meteorology)*, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 283p.
5. Shchukin G.G., Bulkin V.V., *Meteorologicheskie passivno-aktivnye radiolokatsionnye sistemy (Meteorological passive-active radars)*, Murom: IPTs MI VIGU (Vladimir State University Publ.), 2009, 166p.
6. Shchukin G.G., Chichkova E.F., Karavaev D.M., Mikrovolnovyy radiometr dlya validatsii sputnikovykh dannykh temperaturno-vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery (Microwave radiometer for validation of satellite data of the temperature-humidity sounding of the atmosphere), *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2013, No. 1, pp. 28–31.
7. Blackwell W.J., Barrett J.W., Chen F.W., Leslie R.V., Rosenkranz P.W., Schwartz M.J., Staelin D.H., NPOESS Aircraft Sounder Testbed-Microwave (NAST-M): Instrument description and initial flight results, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2001, Vol. 39, No. 11, pp. 2444–2453.
8. Li J., Wolf W., Menzel P., Global Soundings of the Atmosphere from ATOVS Measurements: The Algorithm and Validation, *Journal of Applied Meteorology*, 2000, Vol. 39, No. 8, pp. 1248–1268.