

Восстановление интегральной влажности атмосферы над океанами по данным спутникового микроволнового радиометра AMSR2

Е.В. Заболотских¹, Б. Шапрон^{2,1}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург 195196, Россия
E-mail: liza@rshu.ru

²Французский научно-исследовательский институт по эксплуатации морских ресурсов
Брест, 29280, Франция
E-mail: bchapron@ifremer.fr

В работе рассматривается метод оценки интегральной влажности атмосферы над свободными ото льда районами океана по данным измерений японского спутникового микроволнового радиометра Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) на борту спутника GCOM-W1. Метод основан на результатах численного моделирования радиоярких температур $T_{я}$ уходящего микроволнового излучения системы океан-атмосфера без осадков и использовании нейронно-сетевых подходов для решения обратной задачи. Перед применением метода к данным спутниковых измерений проводится коррекция $T_{я}$ для перехода от модельных значений $T_{я}$ к измеренным. Корректирующие поправки находились на основе сопоставления измерений AMSR2 и расчетных значений $T_{я}$ для базы данных безоблачных измерений профилей влажности атмосферы радиозондами. Валидация метода проводилась на основе сравнения результатов его применения с независимыми данными радиозондирования островных станций. Погрешность метода составила 1,14 кг/м² для тропической станции и 0,86 кг/м² для полярных станций. Общая погрешность метода оказалась равной погрешности, рассчитанной с использованием модельных данных, и составила 1,0 кг/м².

Ключевые слова: интегральная влажность (влагозапас) атмосферы, численное моделирование, радиояркая температура, спутниковая пассивная микроволновая радиометрия, нейронно-сетевые алгоритмы восстановления параметров, AMSR2

Одобрена к печати: 21.11.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-207-215

Введение

Интегральная влажность атмосферы (влагозапас) Q представляет собой общее содержание водяного пара в столбе атмосферы единичного сечения и относится к интегральным параметрам влагосодержания атмосферы, включающим влагозапас атмосферы, водозапас облаков и интенсивность дождя.

Процессы перехода водяного пара в жидкое и твердое состояние и обратно имеют огромное значение для формирования погоды и климата Земли. Они определяют образование тумана, облаков и осадков. Испарение, перенос водяного пара, а затем его конденсация и сублимация являются одними из важнейших процессов переноса энергии в атмосфере (Mieruch et al., 2008). Количественная информация о влагозапасе атмосферы и водозапасе облаков (содержание жидкокапельной влаги) необходима для прогноза осадков и входит в качестве важнейших параметров в климатические модели (Andersson et al., 2007).

Наземные *in-situ* измерения Q производятся при помощи данных радиозондирования о профиле влажности в атмосфере и на сегодняшний день являются эталоном при оценке точности измерений другими методами, хотя измерения радиозондов производятся с конечной точностью, а интегрирование по высоте и ограниченная высота радиозондирования приводят к дополнительным ошибкам в оценке Q . Высокое разрешение измерений радиозондов по вертикали позволяет проводить точные измерения локальной влажности,

за исключением условий верхней тропосферы и нижней стратосферы. Точность измерений радиозондов локальной влажности – порядка 2–3%, что с учетом конечной высоты радиозондирования приводит к точности измерения интегральной влажности 3–5% (Miloshevich et al., 2009). В то же время высокая стоимость данных радиозондирования ограничивает их применение, главным образом для верификации других методов.

Пространственное картирование полей влагозапаса возможно лишь с использованием данных спутникового дистанционного зондирования, которые, кроме того, являются единственным источником данных о влагозапасе над обширными районами океанов.

Данные спутниковых микроволновых сканирующих радиометров на сегодняшний день позволяют восстанавливать влагозапас атмосферы над океанами с самой высокой точностью по сравнению с остальными спутниковыми методами во всем диапазоне его изменчивости. Современные методики определения Q работают с удовлетворительной точностью в условиях без осадков и без облаков с большими значениями водозапаса, ($> 0,5$ кг/м²) (Alishouse et al., 1990; Bobylev et al., 2010; Kazumori, 2012; Mallet et al., 2002; Wang et al., 2009). При этом опубликованная в научных источниках точность оценок Q может оказаться далека от реально рассчитанной при сравнении с данными контактных измерений. Но даже анализ опубликованных точностей позволяет сделать вывод о том, что требуемые точности оценок в настоящее время удовлетворяются лишь при благоприятных погодных условиях – отсутствии осадков и облачности с водозапасом, превышающим 0,3–0,5 кг/м². С ухудшением погодных условий ошибки определения Q при помощи традиционных методов возрастают в несколько раз (Kazumori, 2012).

В данной работе представлен новый метод оценки интегрального влагосодержания атмосферы по данным измерений японского микроволнового радиометра Advanced Microwave Sounding Radiometer 2 (AMSР2), основанный на использовании результатов численного моделирования радиояркостной температуры микроволнового излучения системы океан-атмосфера. Решение обратной задачи основано на использовании регрессионного нейронно-сетевого подхода. Валидация метода осуществлялась путем сравнения результатов применения метода с измерениями Q радиозондами небольших островных станций. Принципиальные отличия данного метода от метода восстановления Q по данным инструментов Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) и AMSR – Earth Observing System (AMSR-E) для полярных атмосфер, описанного в (Bobylev et al., 2010) – использование при моделировании новой зависимости коэффициента излучения от скорости приводного ветра, новой модели поглощения водяного пара и расширение диапазона атмосферных и океанических условий, использованных при расчетах T_r , включая облачность с водозапасом, большим 0,5 кг/м², и сильные ветра (> 15 м/с).

Метод

Метод оценки Q основан на использовании результатов численного моделирования радиояркостной температуры микроволнового излучения системы океан-атмосфера без

рассеяния. Численный эксперимент по замкнутой схеме позволяет моделировать спутниковые измерения с аппаратурой конкретного радиометра и разрабатывать методы оценки геофизических параметров на основе модельных значений T_y .

Моделирование проводилось для параметров японского радиометра AMSR2, функционирующего на орбите спутника GCOM-W1. Данный радиометр измеряет микроволновое излучение на частотах 6,9, 7,3, 10,65, 18,7, 23,8, 36,5 и 89 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризации. При моделировании уходящего микроволнового излучения системы океан-атмосфера использовались модели характеристик взаимодействия излучения со средой, отобранные на основе анализа публикаций последних лет, посвященных данной тематике, и упрощенная форма одномерного уравнения переноса излучения в приближении «чистого поглощения». В деталях модель радиояркой температуры излучения описана в работе (Заболотских, Шапрон, 2016). В данном приближении общее восходящее излучение системы включает в себя 4 составляющие: восходящее излучение атмосферы T ; нисходящее излучение атмосферы, отраженное поверхностью океана и ослабленное слоем атмосферы $T_{\text{опр}}^{\downarrow}$, излучение океана, ослабленное в атмосфере $T_{\text{я ок}}$, и космическое излучение T_k , равное $2,7 \text{ K} \times \exp(-2\tau) (1-\chi)$:

$$T_y = T^{\uparrow} + T_{\text{опр}}^{\downarrow} + T_{\text{я ок}} + T_k, \quad (1)$$

$$T^{\uparrow} = \frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} T(h) \alpha(h) \exp\left(-\frac{1}{\mu} \int_h^{\infty} \alpha(h') dh'\right) dh, \quad (2)$$

$$T_{\text{опр}}^{\downarrow} = (1-\chi) \cdot \exp(-\tau) \cdot \frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} T(h) \alpha(h) \exp\left(-\frac{1}{\mu} \int_0^h \alpha(h') dh'\right) dh, \quad (3)$$

$$\tau = \frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} \alpha(h') dh', \quad (4)$$

$$T_{\text{я ок}} = \chi \cdot T_{\text{ок}} \cdot \exp(-\tau). \quad (5)$$

где τ – оптическая толщина атмосферы, χ – коэффициент излучения океана, $T_{\text{ок}}$ – температура поверхности океана.

При расчете поглощения микроволнового излучения кислородом, жидкокапельной фракцией облаков и водяным паром использовалась методика (Liebe, Layton, 1987). Параметризация коэффициента излучения океана как функция частоты излучения, скорости ветра, температуры поверхности, солёности морской воды, угла визирования и поляризации, заимствована из (Chapron et al., 2010).

Для получения массивов T_y была использована база данных (~3000) аэрологических и судовых измерений глобального и всезонного масштаба. Первичные данные состояли из измерений с научно-исследовательских судов погоды, состоящих из данных радиозондирования по профилям метеопараметров, скоростей приводного ветра, температуры поверхности океана и судовых синоптических наблюдений облачности. Последние позволи-

ли на основании сопоставления с профилями относительной влажности воздуха оценить высоты верхней и нижней границ облачности и с использованием статистических данных о водности различных типов облачности построить модельные профили водности в облаках. С использованием измеренных профилей влажности атмосферы были проведены расчеты влагозапаса атмосферы Q_0 .

Шум аппаратуры, добавляемый к рассчитанным значениям T_y , моделировался в виде нормально распределенного сигнала с дисперсией, соответствующей уровню шумов для каждого канала радиометра. Результаты расчетов в виде массивов T_y и соответствующих значений Q_0 , были организованы в базу данных для последующего решения обратной задачи восстановления влагозапаса Q' .

При решении обратной задачи были использованы нейронные сети. Для этого весь массив данных был разделен на настроочный – для настройки метода и тестирующий – для его проверки и определения характеристик (среднеквадратичной ошибки σ , систематического смещения b и коэффициента корреляции R) метода. Поскольку задача относится к классу регрессионных задач наилучшей аппроксимации, использовалась модель НС на основе многослойного персептрона с обратным распространением ошибок.

Выбор входных параметров НС (обозначим каналы AMSR2 радиометра T18H, T18V, T23H, T23V, T36H, T36V, T89H, T89V для измерений на частотах 18,7, 23,4, 36,5 и 89 ГГц горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно) определялся анализом чувствительности T_y к Q , основанным на результатах модельных расчетов. Использовались 4 наиболее информативных канала – T18H, T23H, T23V, T36H. Настройка метода производилась путем минимизации весовой функции, определенной на настроочном наборе данных методом обратного распространения ошибок. Результирующая среднеквадратичная ошибка оценки, полученная на тестирующем наборе данных, рассматривалась в качестве основной характеристики НС-метода. Тестировались НС с различным количеством нейронов. Результаты тестирования показали, что наименьшее значение $\sigma = 1,0 \text{ кг/м}^2$ – достигается при использовании оптимальной НС с одним скрытым уровнем, состоящим из 5 нейронов. Схема оптимальной НС для восстановления Q по данным AMSR2 представлена на *рис. 1*.

Диаграмма разброса восстановленных по модельным T_y значений Q' от измеренных Q_0 для тестирующего набора данных показана на *рис. 2*. В области высоких ($> 40 \text{ кг/м}^2$) значений влагозапаса ошибки НС алгоритма увеличиваются. Для $Q > 40 \text{ кг/м}^2$ среднеквадратичная ошибка $\sigma = 1,4 \text{ кг/м}^2$.

Следует отметить, что приведенные характеристики работы алгоритма ($\sigma = 1,0 \text{ кг/м}^2$, смещение $b = 0,06 \text{ кг/м}^2$) характеризуют лишь способность НС-функции решать обратную задачу – восстанавливать влагозапас атмосферы из расчетных значений T_y микроволнового излучения системы океан-атмосфера. Фактическая погрешность работы алгоритма, которая будет свидетельствовать не только о точности математического метода решения обратной задачи, но и об адекватности радиационно-метеорологической модели, должна рассчитываться с использованием спутниковых измерений T_y и сопутствующих измерений влагозапаса. Оценка фактической погрешности метода приведена в разделе «Валидация».

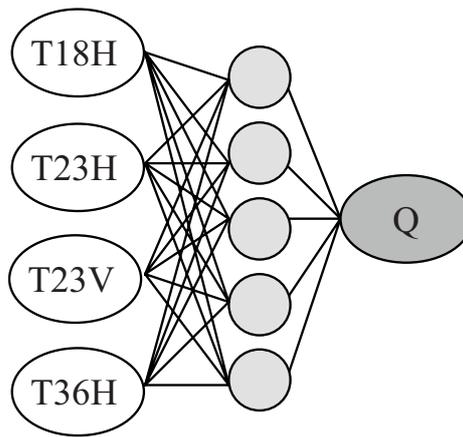


Рис. 1. Схема Нейронной Сети для восстановления интегральной влажности атмосферы Q по данным радиометра AMSR2

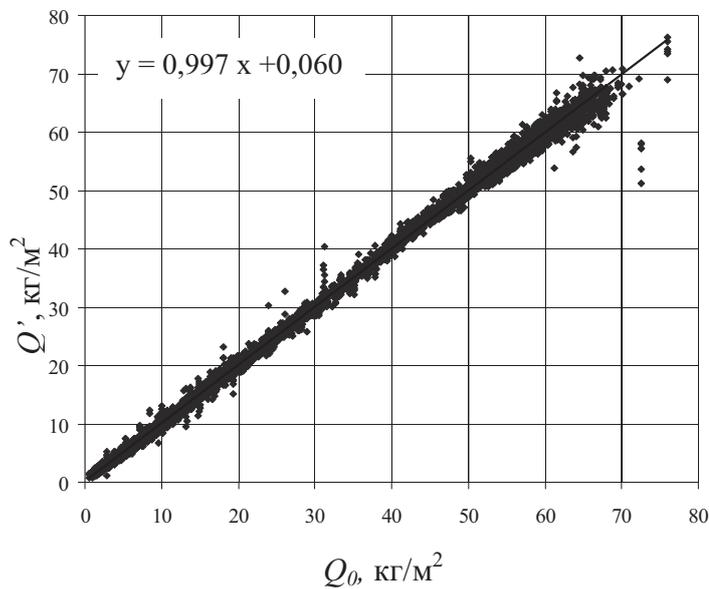


Рис. 2. Диаграмма разброса восстановленных по модельным радиоярким температурам T_a значений влагозапаса атмосферы Q' от измеренных значений Q_0 для тестирующего набора данных

Коррекция модельных значений радиоярких температур

Расчет Q по данным измерений AMSR2 с использованием предложенного метода требует способности при моделировании воспроизводить наблюдаемые радиояркие температуры с низкими значениями систематических ошибок. Систематические ошибки в расчетах T_a являются следствием целого ряда причин, среди которых основными являются инструментальная калибровка и неадекватность используемой модели радиационного переноса. Для приведения в соответствие расчетных и измеренных значений радиоярких температур требуется расчет поправок к модельным значениям T_a , учитывающих суммарно как неопределенности геофизической модели, так и неточности инструментальной калибровки (Zabolotskikh et al., 2014). Добавление найденных поправок дает возможность

использовать модельные значения T_y при оценке Q по данным радиометрических измерений. Использование данного подхода дает возможность корректировать метод при изменении калибровки измерений радиометра AMSR2 (такие изменения с запуска AMSR2 проводились уже трижды).

Для нахождения поправок была использована база данных японского космического агентства, состоящая из совмещенных в пространстве и во времени измерений профилей метеопараметров радиозондами, скаттерометрических (Metop-A ASCAT) измерений скорости ветра и радиометрических измерений AMSR2. На основе анализа сопутствующих изображений спектрорадиометра MODIS в видимом диапазоне из этой базы было отобрано более 1300 безоблачных данных, которые использовались для расчета T_y и сравнения рассчитанных значений T_y с измеренными. Результирующие поправки к представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики массива разностей между измеренными и рассчитанными радиояркими температурами для радиометра AMSR2

	<i>18H</i>	<i>18V</i>	<i>23H</i>	<i>23V</i>	<i>36H</i>	<i>36V</i>
среднее, К	0,28	-0,21	0,90	0,67	-3,81	-4,07
σ , К	1,14	0,77	1,94	1,08	1,22	0,65
минимум, К	-2,24	-1,75	-4,14	-1,95	-6,27	-5,71
максимум, К	2,66	2,43	4,24	3,07	-0,55	-2,37

Полученные средние разности могут быть использованы в качестве корректирующих поправок к результатам модельных расчетов для перехода от рассчитанных T_y к измеренным в любых исследованиях, в том числе при применении рассматриваемого метода оценки влагозапаса атмосферы.

Валидация

Валидация метода восстановления интегрального влагосодержания атмосферы проводилась с использованием прямых измерений влажности радиозондами. Данные радиозондирования были получены с сайта университета Вайоминг (<http://weather.uwyo.edu/urpreair/>). Были использованы данные двух островных станций Jan Mayen (70,9° с.ш., 8,7° з.д.) и Vjornoya (74,5° с.ш., 19,0° в.д.) и одной островной станции в тропических широтах Pago Pago (14,33° ю.ш., 170,71° з.д.). Условием выбора станций радиозондирования являлись: а) небольшие размеры острова – для уменьшения влияния суши на работу алгоритма и б) высота над уровнем моря, не превышающая 10–20 метров над уровнем моря. Отличительной особенностью измерений радиозондов на этих станциях является высокое вертикальное разрешение: один радиозонд измеряет параметры атмосферы на более чем 90 уровнях, что повышает точность расчета влагозапаса по данным радиозондирования. Были использованы 2 года измерений – с 1 января 2013 г. по 31 декабря 2014 г.

Особое внимание было уделено тщательному отбору данных для валидации путем исключения из рассмотрения случаев прохождения над станцией резких атмосферных фронтов. При прохождении фронта над станцией даже небольшая разница между временем запуска радиозонда и радиометрическим измерением приведет к смене воздушных масс и изменению значения влагозапасы атмосферы. Для валидации использовались данные с временной разницей измерений в пределах часа. Пиксели, используемые для восстановления Q_{AMSR2} , выбирались на расстоянии ~ 50 км от станции, чтобы избежать повышения радиояркостной температуры, вызванного влиянием попадания суши в диаграмму направленности радиометра. Всего было использовано ~ 490 сопутствующих измерений. Результирующие значения восстановленного влагозапаса Q_{AMSR2} сравнивались с $Q_{p/3}$ и определялись фактические характеристики метода.

Диаграмма разброса Q_{AMSR2} от $Q_{p/3}$ для станции Раго Раго в тропических широтах и станций станций Jan Maeyen и Вјорноуа в полярных широтах представлена на *рис. 3*.

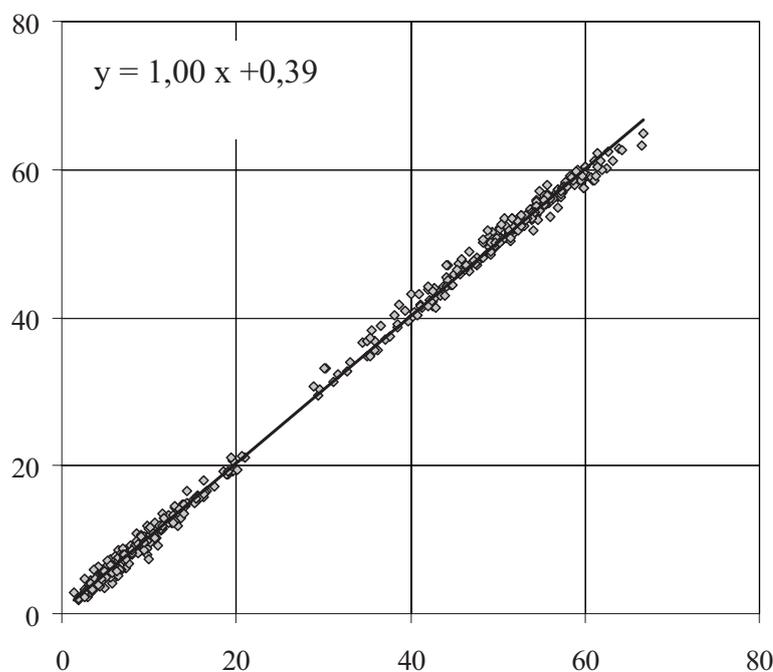


Рис. 3. Диаграмма разброса восстановленных по данным AMSR2 значений интегральной влажности атмосферы Q_{AMSR2} от рассчитанных по измерениям радиозондов значений $Q_{p/3}$

Анализ сравнения результатов применения метода к спутниковым радиометрическим измерениям AMSR2 с данными радиозондирования по интегральной влажности атмосферы позволяет сделать вывод, что в тропических районах, характеризующихся высокими значениями Q (среднее значение Q для станции Раго Раго составило $50,1 \text{ кг/м}^2$), метод обладает погрешностью $\sim 1,14 \text{ кг/м}^2$ (2,3%), а в полярных районах, характеризующихся низкими значениями Q (среднее значение $Q \sim 10,3 \text{ кг/м}^2$), погрешность составляет $\sim 0,68 \text{ кг/м}^2$ (6,6%). Погрешность, рассчитанная с использованием всех данных $\sigma = 1,0 \text{ кг/м}^2$.

Заключение

В работе представлен метод оценки интегральной влажности атмосферы Q над районами океана, свободными от морского льда, по данным измерений японского спутникового микроволнового радиометра AMSR2 со спутника GCOM-W1. Метод основан на использовании результатов численного моделирования радиоярких температур уходящего излучения системы океан-атмосфера T_y в одномерном приближении нерассеивающей атмосферы для характеристик каналов радиометра AMSR2 и решении обратной задачи с использованием нейронных сетей. Перед применением метода к данным спутниковых измерений AMSR2 была проведена коррекция радиоярких температур для перехода от рассчитанных T_y к измеренным. Корректирующие поправки находились на основе сопоставления измерений AMSR2 и расчётных значений T_y для базы данных безоблачных измерений профилей влажности атмосферы радиозондами в разных районах Мирового Океана.

Валидация метода была проведена с использованием независимых данных радиозондов островных станций Jan Mayen и Vjornoya в полярных широтах и станции Pago Pago в тропических широтах. Погрешность метода составила $\sigma = 1,14$ кг/м² для тропической станции и $\sigma = 0,86$ кг/м² для полярной станции. Общая погрешность метода составила $\sigma = 1,0$ кг/м², т.е. оказалась равной погрешности, рассчитанной с использованием модельных данных. Подобная высокая точность метода позволяет использовать результаты восстановления Q в самых разных задачах как по изучению атмосферных процессов и явлений, так и в климатических исследованиях.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете при поддержке Минобрнауки России по проекту RFMEFI58615X0017.

Литература

1. *Заболотских Е.В., Шапрон Б.* Нейронно-сетевой метод оценки интенсивности дождя над океанами по данным измерений спутникового радиометра AMSR2 // Известия. Физика Атмосферы и Океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 82–88.
2. *Alishouse J.C., Snyder S.A., Vongsathorn J., Ferraro R.R.* Determination of oceanic total precipitable water from the SSM/I // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1990. Vol. 28. No. 5. P. 811–816.
3. *Bobilev 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 Trans. Geosci. Remote Sens. 2010. Vol. 48. No. 1. P. 283–294.
4. *Chapron B., Bingham A., Collard F., Donlon C., Johannessen J.A., Piolle J.F., Reul N.* Ocean remote sensing data integration-examples and outlook // Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society. ESA Publication. WPP-306. 2010.
5. *Kazumori M.* A retrieval algorithm of atmospheric water vapor and cloud liquid water for AMSR-E // Eur. J. Remote Sens. 2012. P. 63–74.
6. *Liebe H.J., Layton D.H.* Millimeter-wave properties of the atmosphere: Laboratory studies and propagation modeling // Nat. Tech. Inf. Service. Boulder, CO. 1987.
7. *Mallet C., Moreau E., Casagrande L., Klapisz C.* Determination of integrated cloud liquid water path and total precipitable water from SSM/I data using a neural network algorithm // Int. J. Remote Sens. 2002. Vol. 23. No. 4. P. 661–674.
8. *Mieruch S., Noël S., Bovensmann H., Burrows J.P.* Analysis of global water vapour trends from satellite measurements in the visible spectral range // Atmospheric Chem. Phys. 2008. Vol. 8. No. 3. P. 491–504.
9. *Miloshevich L.M., Vömel H., Whiteman D.N., Leblanc T.* Accuracy assessment and correction of Vaisala RS92 radiosonde water vapor measurements // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. No. D11. C. D11305.

10. Wang Y., Fu Y., Liu G., Liu Q., Sun L. A new water vapor algorithm for TRMM Microwave Imager (TMI) measurements based on a log linear relationship // *J. Geophys. Res. Atmospheres*. 2009. Vol. 114. No. D21. P. D21304.
11. Zabolotskikh E., Mitnik L., Chapron B. An Updated Geophysical Model for AMSR-E and SSMIS Brightness Temperature Simulations over Oceans // *Remote Sens*. 2014. Vol. 6. No. 3. P. 2317–2342.

Atmospheric total water vapor content retrieval using satellite microwave radiometer measurements of AMSR2

E.V. Zabolotskikh¹, B. Chapron^{2,1}

¹*Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 195196, Russia*

E-mail: liza@rshu.ru

²*IFREMER, Brest 29280, France*

E-mail: bchapron@ifremer.fr

The method of integrated water vapor content retrieval over open ocean from the data of Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) onboard GCOM-W1 satellite is presented. The method is based on the numerical modeling of the brightness temperatures of non-precipitating ocean-atmosphere system. Neural Network approach is used for the inverse problem solution. Before use measured brightness temperatures are corrected to adjust model values to measured ones. This adjustment is based on the comparison of the AMSR2 measurements and brightness temperature calculations for the database of cloudless radiosounding measurements. The validation is fulfilled using independent radiosounding data from small island stations. The retrieval accuracy proved to be 1.14 kg/m² for the tropical radiosounding station and 0.86 kg/m² for polar stations. The total retrieval accuracy proved to be equal to the one calculated using model data – 1 kg/m².

Keywords: integrated water vapor content, numerical modeling, brightness temperature, satellite passive microwave radiometers, Neural Network retrieval algorithms, AMSR2

Accepted: 21.11.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-207-215

References

1. Zabolotskikh E.V., Chapron B., Neyronno-cetevoy metod otsenki intensivnosti dozhdya nad okeanami po dannym izmereniy sputnikovogo radiometra AMSR2 (Neural Network algorithm for rain rate retrieval over oceans using AMSR2 data), *Izvestiya. Fizika Atmosfery i Okeana*, 2016, Vol. 52, No. 1. pp. 82–88.
2. Alishouse J.C., Snyder S.A., Vongsathorn J., Ferraro R.R., Determination of oceanic total precipitable water from the SSM/I, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1990, Vol. 28, No. 5, pp. 811–816.
3. 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 Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2010, Vol. 48, No. 1, pp. 283–294.
4. Chapron B., Bingham A., Collard F., Donlon C., Johannessen J.A., Piolle J.F., Reul N., Ocean remote sensing data integration-examples and outlook, *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society, ESA Publication, WPP-306*, 2010.
5. Kazumori M., A retrieval algorithm of atmospheric water vapor and cloud liquid water for AMSR-E, *Eur. J. Remote Sens.*, 2012, pp. 63–74.
6. Liebe H.J., Layton D.H., Millimeter-wave properties of the atmosphere: Laboratory studies and propagation modeling: *Nat. Tech. Inf. Service*, Boulder, CO, 1987.
7. Mallet C., Moreau E., Casagrande L., Klapisz C., Determination of integrated cloud liquid water path and total precipitable water from SSM/I data using a neural network algorithm, *Int. J. Remote Sens.*, 2002, Vol. 23, No. 4, pp. 661–674.
8. Mieruch S., Noël S., Bovensmann H., Burrows J.P., Analysis of global water vapour trends from satellite measurements in the visible spectral range, *Atmospheric Chem. Phys.*, 2008, Vol. 8, No. 3, pp. 491–504.
9. Miloshevich L.M., Vömel H., Whiteman D.N., Leblanc T. Accuracy assessment and correction of Vaisala RS92 radiosonde water vapor measurements, *J. Geophys. Res.*, 2009, Vol. 114, No. D11, p. D11305.
10. Wang Y., Fu Y., Liu G., Liu Q., Sun L., A new water vapor algorithm for TRMM Microwave Imager (TMI) measurements based on a log linear relationship, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 2009, Vol. 114, No. D21, p. D21304.
11. Zabolotskikh E., Mitnik L., Chapron B., An Updated Geophysical Model for AMSR-E and SSMIS Brightness Temperature Simulations over Oceans, *Remote Sens.*, 2014, Vol. 6, No. 3, pp. 2317–2342.