

Алгоритм оценки приводного ветра в тропической зоне по данным микроволнового радиометра AMSR-E и его применение к анализу погодных систем

М.Л. Митник, Л.М. Митник

*Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН (ТОИ ДВО РАН)
690041 Владивосток, Балтийская ул., 43, e-mail: maia@poi.dvo.ru*

Приведено описание алгоритмов восстановления скорости приводного ветра W в тропиках по микроволновым измерениям многоканального сканирующего радиометра AMSR-E со спутника Aqua. Алгоритмы разработаны по модельным яркостным температурам ТЯВ,Г(ν) системы океан-атмосфера (COA) на частотах ν на вертикальной (В) и горизонтальной (Г) поляризациях, рассчитанным с использованием базы судовых и островных радиозондовых данных в тропиках с учетом шумов радиометра. Алгоритмы настроены на оценку ветра в районах океана с температурой поверхности $t_0 \geq 25^\circ\text{C}$. В регрессионном алгоритме оценка W выполняется по ТЯВ,Г(ν) на $\nu = 6.9$ и 10.7 ГГц. Получены соотношения между восстановленными и исходными значениями скорости ветра. В алгоритме, основанном на рассмотрении физики переноса излучения в COA, ветер определяется по ТЯГ(11) и по ТЯВ(24) и ТЯВ(36) на $\nu = 23.8$ и 36.5 ГГц, соответственно. Погрешности оценки ветра возрастают с ростом водозапаса облаков Q . Случаи с большим поглощением в атмосфере, обусловленные облачностью и осадками, фильтруются по величине поляризационной разности на $\nu = 36.5$ ГГц $\Delta\text{ТЯ}(36) = \text{ТЯВ}(36) - \text{ТЯГ}(36)$. В качестве пороговых значений приняты значения разности 15 К или 20 К. Приведены примеры применения алгоритма для восстановления поля приводного ветра в тропических циклонах.

Ключевые слова: яркостные температуры, коэффициент излучения морской поверхности, приводный ветер, паросодержание атмосферы, водозапас облаков, алгоритмы, AMSR-E, Aqua, тропические циклоны.

Введение

Прогресс в изучении взаимодействия микроволнового излучения с шероховатой поверхностью, с атмосферными газами, мелкими (облака) и крупными (дожди) каплями воды в сочетании с совершенствованием приборов дистанционного зондирования, методик их калибровки и валидации данных стимулировал появление более точных алгоритмов решения обратных геофизических задач. Восстановление параметров океана и атмосферы в тропиках представляет особый интерес в связи с современным изменением климата, проявляющемся, в частности, в изменчивости положения внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) и интенсивности тропических циклонов (ТЦ).

Паросодержание атмосферы V , водозапас облаков Q и интенсивность осадков R определяют спектры поглощения и рассеяния излучения и спектр яркостных температур $T_{\text{я}}(\nu)$, регистрируемых спутниковыми микроволновыми радиометрами на частотах ν . В пределах ВЗК и в области ТЦ значения V , Q и R заметно превышают фоновые. На основе численных экспериментов с моделью переноса микроволнового излучения в системе океан-атмосфера (Митник, Митник, 2006) был разработан алгоритм восстановления скорости приводного ветра по данным AMSR-E (Mitnik, Mitnik, 2010; Митник, Митник, 2011), применимый в широком диапазоне изменчивости характеристик морских погодных систем. При моделировании были использованы более точные соотношения, описывающие спектры поглощения в атмосферных газах и облаках (Cadedu, 2010; Cimini et al., 2009; Kneifel et al., 2009; Payne et al., 2008, 2010; Turner et al., 2009), спектр диэлектрической проницаемости воды (Meissner,

Wentz, 2004) и зависимости коэффициента излучения морской воды от скорости приводного ветра W , включая значения W , превышающие 20 м/с (Aziz et al., 2005; Shibata, 2006a,b; Uhlhorn et al., 2007).

Моделирование

Для моделирования измерений радиометра AMSR-E и разработки алгоритмов восстановления скорости ветра была использована база данных, созданная на основе 2050 наборов радиозондовых, метеорологических и гидрологических измерений, выполненных на судах Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института и на японском судне “Кейфу Мару” в Тихом и Индийском океанах. Данные радиозондирования представляет собой значения давления $P(h_i)$, температуры $T(h_i)$ и относительной влажности атмосферы $U(h_i)$ и скорости ветра $W(h_i)$ на нескольких десятках уровней $i = 1, \dots, n$ от минимального уровня над поверхностью моря до максимальной (20-35 км). При построении профиля водности облаков использовались данные о количестве и типах облаков по судовым наблюдениям и статистические данные о водности. К судовым данным были присоединены 459 наборов измерений, выполненных на островных метеостанциях. В дальнейшем база была расширена до примерно 12500 наборов данных (в дальнейшем «точек») путем включения флуктуаций ветра и 2-4 профилей водности облака для каждого радиозонда. Описание формирования базы данных приведено в (Mitnik, Mitnik, 2003; Митник, Митник, 2006).

Для разработки алгоритма восстановления скорости ветра в тропиках был подготовлен массив из 2152 точек, в который были отобраны случаи с температурой поверхности океана (ТПО) $t_o \geq 25^\circ\text{C}$ и водозапасом облаков $Q \leq 2 \text{ кг/м}^2$ (таблица 1).

Таблица 1. Количество точек в каждой градации для основных параметров массива

Скорость ветра, м/с		Паросодержание атмосферы, кг/м ²		Водозапас облаков, кг/м ²	
0 - 5	904	< 20	6	0	898
5 - 10	932	20 - 30	30	0 - 0.2	766
10 - 20	292	30 - 40	126	0.2 - 0.5	284
20 - 30	23	40 - 50	405	0.5 - 1.0	204
≥ 30	2	50 - 60	1136	1.0 - 1.5	79
		$V \geq 60$	449	1.5 - 2.0	30

Расчет яркостных температур $T_{\text{я}}^{\text{B},\Gamma}(\nu)$ для этого массива выполнялся путем численного интегрирования уравнения переноса микроволнового излучения в системе океан-атмосфера (Митник, Митник, 2006). На расчетные значения $T_{\text{я}}^{\text{B},\Gamma}(\nu)$ были наброшены шумы, распределенные по нормальному закону с дисперсией, соответствующей шумам радиометра.

Физический и статистический алгоритмы

Для оценки скорости ветра в тропиках были разработаны два алгоритма: физический, основанный на рассмотрении переноса излучения в СОА, и *регрессионный*. В рассматриваемой тропической версии *физического алгоритма*, основные соотношения которого при-

ведены в (Mitnik, Mitnik, 2010; Митник, Митник, 2011), был скорректирован ряд аппроксимаций, которые приведены ниже. Для зависимости отношения поглощений в капельных облаках на частотах 10.7 и 36.5 ГГц от температуры $t_{обл}$ получена формула:

$$R = \tau_{обл}(10.7) / \tau_{обл}(36.5) = 0.09469 - 0.000574 t_{обл} + 0.0000278 t_{обл}^2 - 7.038E-7 t_{обл}^3 \quad (1)$$

Эффективная температура облачных капель $t_{обл}$ менялась в диапазоне от 5 до 17°C, что определяется разностью $\Delta T = t_{обл} - t_o = 15-20$ К и $t_o = 25-32$ °C.

Зависимость коэффициента излучения спокойной поверхности океана на частоте 10.7 ГГц на горизонтальной поляризации от ТПО в диапазоне 25-32°C была аппроксимирована соотношением:

$$\kappa^r(t_o) = 0.2398 - 0.00044 t_o + 0.632E-5 t_o^2 \quad (2)$$

Зависимость яркостной температуры спокойной поверхности океана на $\nu = 10.7$ ГГц на Г-поляризации $T_{яок}(11Г, t_o)$ от температуры описывалась квадратичной формой:

$$T_{яок}(10.7, t_o) = 65.630 + 0.1042 t_o + 0.0018 t_o^2 \quad (3)$$

При росте t_o от 25 до 32°C значения $T_{яок}(11Г)$ возрастают на 1.4 К - от 69.4 до 70.8 К.

Погрешность алгоритма оценивалась по данным замкнутого численного эксперимента. Для ситуаций с водозапасом $Q \leq 1$ кг/м² среднеквадратичная погрешность восстановления скорости ветра σ_a равна примерно 1.0 м/с (рис. 1а). Уравнение линейной регрессии между восстановленными значениями скорости ветра W_B и истинными W_o (входные значения при моделировании), имеет следующий вид: $W_B = -0.05 + 0.99 W_o$. При $Q \leq 0.5$ кг/м² (2000 точек) погрешность σ_a уменьшается до 0.6 м/с.

Оценка V и Q выполняется в алгоритме на основе алгебраизации уравнения переноса микроволнового излучения в СОА. При этом помимо теоретических соотношений, используется ряд эмпирических зависимостей (Митник, Митник, 2006; Mitnik, Mitnik, 2003; Mitnik et al., 2009).

Для индикации мощной облачности, где погрешность оценки ветра возрастает, используется пороговое значение поляризационной разности - разности яркостных температур на частоте 36.5 ГГц на В- и Г-поляризациях $\Delta T(36) = T_{я}(36В) - T_{я}(36Г)$. Водозапасу $Q = 0.5$ кг/м² соответствует диапазон значений $\Delta T(36) = 18-23$ К, что обусловлено зависимостью поглощения в облаках от температуры капелек.

В регрессионном алгоритме минимальные погрешности восстановления были получены при использовании всех четырех низкочастотных каналов AMSR-E. Скорость ветра находится по соотношению:

$$W = a_o + a_1 T_{я}(6В) + a_2 T_{я}(6Г) + a_3 T_{я}(11В) + a_4 T_{я}(11Г) \quad (4)$$

Коэффициенты a_i , $i = 0, \dots, 4$ были определены для нескольких массивов, отличающихся величиной максимального водозапаса облаков (поглощения в атмосфере). Для массива с $Q \leq 1$ кг/м² были найдены следующие значения коэффициентов в выражении (4): $a_o = 16.751$, $a_1 = 0.0120$, $a_2 = 1.48875$, $a_3 = -0.64434$ и $a_4 = -0.27349$. Уравнение линейной регрессии имеет следующий вид: $W_B = -1.17 + 1.02 W_o$ (рис. 1б).

Среднеквадратичная погрешность восстановления скорости ветра для этого массива составила $\sigma_w = 0.35$ м/с (рис. 1б), что примерно в 2.8 раза меньше, чем у физического алгоритма. Столь большое различие обусловлено существенно меньшим влиянием поглощения в облаках на $T_{я}(6В)$ и $T_{я}(6Г)$ по сравнению с $T_{я}$ на частотах, используемых в физическом алгоритме. Использование в алгоритме $T_{я}(6В)$ и $T_{я}(6Г)$ сопровождается, однако, ухудшением разрешения: размер пикселя на $\nu = 6.9$ ГГц составляет 40 x 70 км, в то время как он равен 27 x 46 км на $\nu = 10.7$ ГГц и всего 8 x 14 км на $\nu = 36.5$ ГГц.

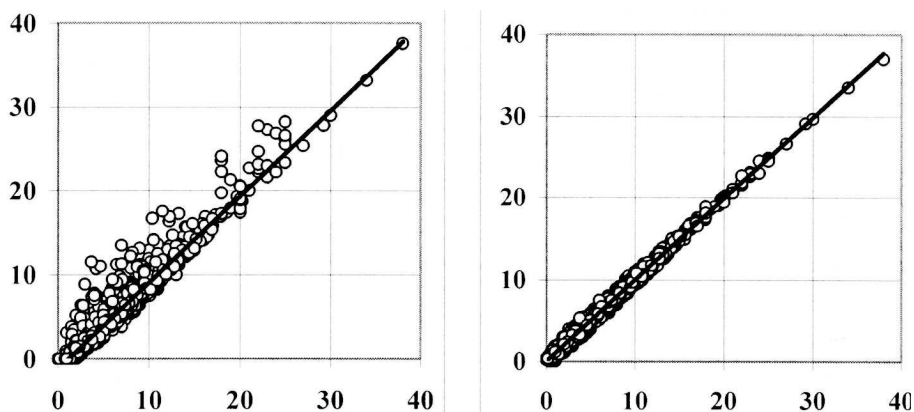


Рис. 1. Корреляция восстановленных и исходных значений скорости ветра по данным численных экспериментов: (а) физический алгоритм и (б) статистический алгоритм

Тайфуны Fanari и Melor

Тропическая версия физического алгоритма была применена при обработке данных AMSR-E, полученных над тропическими циклонами. На рис. 2 показаны поля яркостных температур ТЦ Fanari и рассчитанные по ним паросодержание атмосферы, водозапас облаков и поглощение в облаках на $\nu = 10.7$ ГГц.

Поле ветра, найденное по алгоритму (рис. 3а), хорошо согласуется с полем, восстановленным по данным скаттерометра ASCAT (рис. 3б). Из-за малого количества сопряженных во времени и по пространству данных сопоставление с океаническими буями не проводилось. При сопоставлении необходимо учитывать пространственное сглаживание полей ветра, восстановленных по данным AMSR-E.

В тропической зоне и особенно в тропических циклонах поглощение в атмосфере на частоте 36.5 ГГц увеличивается, и вклад вариаций яркостной температуры океана, обусловленных действием ветра, в вариации $T_{я}^{B,G}(\nu)$, регистрируемые спутниковыми радиометрами, снижается. Поэтому в ситуациях с мощной облачностью и осадками оценка W выполняется с большей погрешностью и даже становится невозможной. Такие районы идентифицируются по заданному порогу водозапаса облаков, или по разности яркостных температур на В- и Г-поляризациях $\Delta T(36) = T_{я}(36В) - T_{я}(36Г)$. На рис. 4 приведены результаты обработки яркостных температур, измеренных 4 октября 2009 г. над тайфуном Melor, когда давление в его центре составляло 920 мб. В области центрального облачного пятна, где паросодержание атмосферы ≥ 65 кг/м², а водозапас облаков ≈ 1 кг/м² (в спиральных рукавах и в стене глаза $Q \geq 1.5$ кг/м²), значения $\Delta T(36)$ не превышают 5 К. Скорость ветра в области, выделенной белым цветом, больше 50 м/с (рис. 4а), но погрешность этой оценки может быть значительна.

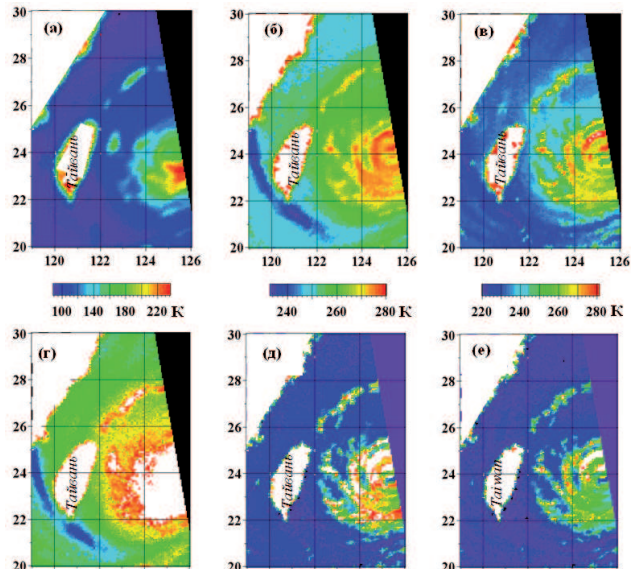


Рис. 2. Яркостные температуры на горизонтальной поляризации на частоте 10.7 ГГц (а) и на вертикальной поляризации на частотах 23.8 ГГц (б) и 36.5 ГГц (в) и рассчитанные по ним поля паросодержания атмосферы (г), водозаписа облаков (д) и поглощения в облаках (е) в области тайфуна Гапарі 18 сентября 2010 г. в 05:30 Гр

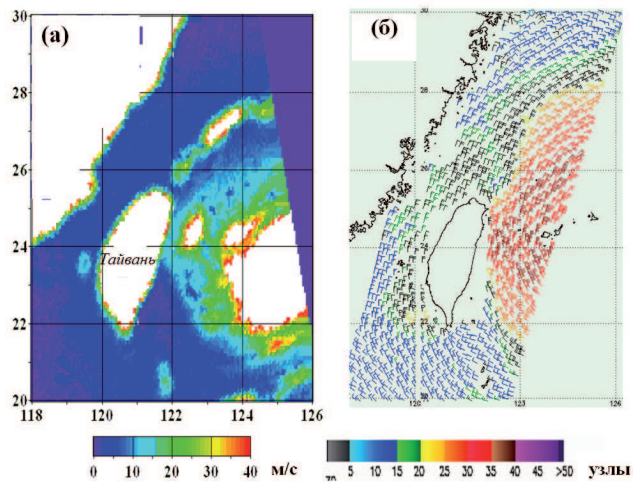


Рис. 3. Поля приводного ветра в области тайфуна Гапарі 18 сентября 2010 г., восстановленные по измерениям (а) радиометра AMSR-E со спутника Аква в 0:30 Гр. и (б) скаттерометра ASCAT со спутника MetOp в 02:02 Гр. (цветовая шкала - скорость ветра в узлах)

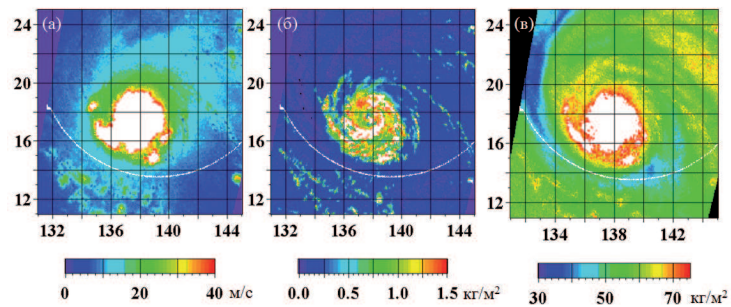


Рис. 4. Поля скорости приводного ветра (а), паросодержания атмосферы (б), водозаписа облаков (в) и поляризацонной разности $\Delta T_{\theta}(36)$ (г) в области тайфуна Melor по измерениям радиометра AMSR-E со спутника Аква 5 октября 2009 г. в 17:12 Гр

Заключение

Продолжается усовершенствование существующих и разработка новых вариантов алгоритмов оценки скорости приводного ветра, в частности, с использованием Тя на частоте 18.7 ГГц вместо 36.5 ГГц. Более высокие точности восстановления интегральных параметров атмосферы обеспечивает нейронно-сетевой алгоритм (Bobilev et al., 2010). Как и алгоритмы (Митник, Митник, 2006; Mitnik, Mitnik, 2003; Mitnik et al., 2009), он разработан на основе численного интегрирования уравнения переноса микроволнового излучения в системе океан-атмосфера с использованием разработанной в ТОИ ДВО РАН базы гидрометеорологических данных. Привлекают внимание и измерения на 6.9 ГГц, обеспечивающие оценку W при более высоких значениях водозапаса облаков, а также при слабых осадках (Meissner, Wentz, 2009; Shibata, 2006a,b). Они, однако, обладают худшим пространственным разрешением, что приводит к сглаживанию восстановленных полей ветра, уменьшению его пространственных градиентов и максимальных значений, то-есть тех параметров, которые представляют особый интерес для оценки интенсивности и прогноза ТЦ. Кроме того, измерения на этой частоте подвержены влиянию помех, создаваемых наземными и спутниковыми радиоизлучающими системами.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 08_05_99109-р_офи и 09_05_13569_офи_ц, ФЦП “Мировой океан” (договора 4/09 и 6/10 и тема 2011-16-420-8-012) и проекта № 111 по соглашению между Японским аэрокосмическим исследовательским агентством (JAXA) и ТОИ ДВО РАН. Данные измерений AMSR-E со спутника Aqua получены из JAXA.

Литература

1. Митник М.Л., Митник Л.М. Восстановление паросодержания атмосферы и водозапаса облаков над океаном по данным микроволнового зондирования со спутников DMSP, TRMM, AQUA и ADEOS-II // Исслед. Земли из космоса, 2006. № 4. С. 34-41.
2. Митник М.Л., Митник Л.М. Алгоритм восстановления скорости приводного ветра по измерениям микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Aqua // Исслед. Земли из космоса, 2011 (в печати).
3. Aziz M.A., Reising S.C., Asher W.E. et al. Effects of air-sea interaction parameters on ocean surface microwave emission at 10 and 37 GHz // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2005. V. 43. № 8. P. 1763-1774.
4. 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 Sensing, 2010. V. 49. № 1. P. 283-294.
5. Cadeddu M.P. Evaluation of cloud liquid absorption models at 90 and 150 GHz // Abstracts of 11th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment. 1-4 March 2010. Washington, DC. USA. P. 107.
6. Cimini D., Nasir F., Westwater E.R. et al. Comparison of ground based millimeter-wave observations in the Arctic winter // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2009. V. 47. № 9. P. 3098-3106.
7. Kneifel S., Crewell S., Löhnert U., Schween J. Investigating water vapor variability by ground-based microwave radiometry: Evaluation using airborne observations // IEEE Geoscience Remote Sensing Letters, 2009. V. 6. № 1. P. 157-161.
8. Meissner T., Wentz F. The dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing, 2004. V. 42. № 9. P. 1836-1849.
9. Meissner T., Wentz F.J. Wind vector retrievals under rain with passive satellite microwave radiometers // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2009. V. 47. P. 3065-3083, doi:10.1109/TGRS.2009.2027012.

9. *Mitnik L.M., Mitnik M.L.* Retrieval of atmospheric and ocean surface parameters from ADEOS-II AMSR data: comparison of errors of global and regional algorithms // *Radio Science*, 2003. V. 38. № 4. 8065, doi: 10.1029/2002RS002659. P. 30-1 –30-10.
10. *Mitnik L.M., Mitnik M.L.* AMSR-E advanced wind speed retrieval algorithm and its application to marine weather systems // *Proc. IGARSS 2010, Hawaii, USA*. P. 3224-3227.
12. *Mitnik L.M., Mitnik M.L., Zabolotskikh E.V.* Microwave sensing of the atmosphere-ocean system with ADEOS-II AMSR and Aqua AMSR-E // *J. Remote Sensing Society Japan*, 2009. V. 29. № 1. P. 156-165.
13. *Payne V.H., Delamere J.S., Cady-Pereira K.E.* et al. Air-broadened half-widths of the 22- and 183-GHz water-vapor lines // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2008. V. 46. № 11. P. 3601–3617.
14. *Payne V., Cady-Pereira K., Moncet J.-L.* Water vapor continuum absorption in the microwave // *Abstracts of 11th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment*. 2010. Washington, DC. USA. P. 58.
15. *Shibata A.* Features of ocean microwave emission changed by wind at 6 GHz // *J. Oceanography*, 2006a. V. 62. P. 321–330.
16. *Shibata A.A.* Wind speed retrieval algorithm by combining 6 and 10 GHz data from Advanced Microwave Scanning Radiometer: Wind speed inside hurricanes // *J. Oceanography*, 2006b. V. 62. P. 351-359.
17. *Turner D.D., Cadeddu M.P., Lohnert U.* et al. Modifications to the water vapor continuum in the microwave suggested by ground-based 150-GHz observations // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2009. V. 47. № 10. P. 3326-3337.
18. *Uhlhorn E.W., Black P.G., Franklin J.L.*, et al. Hurricane surface wind measurements from an operational Stepped Frequency Microwave Radiometer // *Monthly Weather Review*, 2007. V. 135. № 9. P. 3070–3085.

Algorithm for sea surface wind retrieval in tropics from AMSR-E data and its application to analysis of weather system

M.L. Mitnik and L.M. Mitnik

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
43 Baltiyskaya Street, Vladivostok 690041, Russia. E-mail: maia@poi.dvo.ru*

The description of algorithms of the sea surface wind speed W retrieval from Aqua AMSR-E passive microwave measurements is given. Algorithms were developed on the basis of the modelled brightness temperatures of the ocean-atmosphere system $T_{BVH}(\nu)$ at frequencies ν with vertical (V) and horizontal (H) polarization. $T_{BVH}(\nu)$ were computed with the use of tropical ship and island radiosonde data taking into account radiometer noises. $T_{BV,H}(\nu)$ at $\nu = 6.9$ and 10.7 GHz were used for W retrieval in regression algorithm. Wind speed in algorithm based on consideration of physics of microwave radiative transfer in the ocean-atmosphere system was derived with the brightness temperatures T_{BH} (11), $T_{BV}(24)$ and $T_{BV}(36)$ at frequencies of 10.7, 23.8 and 36.5 GHz, accordingly. The regression relationships between retrieved and reference values of wind speed were obtained. Retrieval errors increase with the increase of total cloud liquid water content Q . Cases with high atmospheric attenuation caused by heavy clouds and rains are filtered using polarisation difference at $\nu = 36.5$ GHz: $\Delta T_{B(36)} = T_{BV}(36) - T_{BH}(36)$. $\Delta T_{B} = 15$ K or 20 K was accepted as a threshold value. Algorithms were developed for wind speed estimate in the ocean areas with the surface temperature $t \geq 25^\circ\text{C}$. Examples of sea surface wind retrieval in tropical cyclones are given.

Keywords: brightness temperatures, sea surface emissivity, near-surface wind, total water vapor content, total cloud liquid water content, algorithms, AMSR-E, Aqua, tropical cyclones.