

ESTIMATION OF SNOW WATER EQUIVALENT USING AMSR-2 DATA

Victor Yu. Romasko^(1,2), Dmitriy A. Burakov^(2,4), Ivan N. Gordeev^(2,3)

⁽¹⁾Siberian Center of State Research Center «Planeta», Novosibirsk, Russia

⁽²⁾Siberian Hydrometeorological Research Institute, Novosibirsk

⁽³⁾Mid-Siberian Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring

⁽⁴⁾Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: Standard algorithm of estimation of snow water equivalent using data from AMSR-2 microwave radiometer at GCOM-W1 satellite is discussed. Comparison of satellite snow water equivalent data with ground based ones reveals significant limitations for hydrological applications of this data.

Keywords: snow water equivalent, remote sensing, microwave sensing, AMSR.

ОЦЕНКА СНЕГОЗАПАСОВ ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВОГО РАДИОМЕТРА AMSR-2

Ромасько В. Ю.⁽¹⁾⁽²⁾, Гордеев И. Н.⁽³⁾⁽²⁾, Бураков Д.А.⁽⁴⁾⁽²⁾

⁽¹⁾ Сибирский центр ФГБУ «НИЦ Планета», г. Новосибирск

⁽²⁾ ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт», г. Новосибирск

⁽³⁾ ФГБУ Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Красноярск

⁽⁴⁾ ФГБОУ ВО Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск

Рассмотрена стандартная методика оценки снегозапасов по данным микроволнового радиометра AMSR-2, установленного на спутнике GCOM-W1. Проведён сравнительный анализ результатов оценки снегозапасов с наземными данными маршрутной снегосъёмки, показавший наличие существенных ограничений для применения спутниковых данных в гидрологической практике.

Ключевые слова: запасы воды в снеге, дистанционное зондирование, микроволновая съёмка, AMSR.

Введение. Снежный покров со спутников наблюдается практически с первых попыток взглянуть на Землю с орбиты. И картографирование снежного покрова на регулярной основе ведётся уже с 1966 г [1]. Однако, задача определения высоты снежного покрова или запасов воды в снеге оказалась существенно сложнее. Первая предложенная методика была опубликована только в 1982 г [2] и рассчитана на использование данных микроволнового радиометра SMMR со спутника Nimbus 7. После ряда последующих работ [3–5], основанных на данных того же и последующих микроволновых радиометров, таких как SSM/I на КА DMSP и AMSR-E на КА Aqua, сформировался современный подход к оценке высоты снежного покрова и запасов воды в снеге по измерениям радиационной температуры в различных диапазонах сантиметровых волн.

Запасы воды в снеге являются ключевым параметром во всех прогностических гидрологических моделях стока, включающих моделирование снеготаяния. Прямая дистанционная оценка пространственного распределения запасов воды в снеге в пределах речного бассейна могла бы заменить ныне применяющиеся точечные (в масштабах бассейна) данные наземных маршрутных снегосъёмок и исключить процедуру их экстраполяции на весь бассейн.

Описание метода. В настоящее время на орбите действует КА GCOM-W1, имеющий на борту микроволновой радиометр AMSR-2, данные которого централизованно принимаются и обрабатываются в Японском космическом агентстве, и доступны для свободного использования. Этот радиометр имеет коническую развёртку с углом к вертикали 55° , гарантирующую постоянство размеров мгновенного поля зрения на местности. Главное параболическое зеркало диаметром 2 м обеспечивает хорошую фокусировку и малое мгновенное поле зрения. Радиометр имеет 8 каналов в диапазоне от 6 до 90 ГГц. Разрешение на местности пропорционально длине волны и составляет от 3×5 до 35×62 км. Угол сканирования в 122° с солнечно-синхронной орбиты высотой 700 км обеспечивает полосу захвата шириной 1600 км, чего, однако, недостаточно для полного покрытия поверхности Земли каждые сутки. Полное покрытие за сутки обеспечивается только для широт выше 51° .

Данные AMSR-2 собираются и обрабатываются централизованно и доступны в трёх вариантах обработки. Формат обмена данными — HDF5. В настоящем исследовании использовались данные 3-го уровня обработки на сетке $0,1^\circ$ в географической системе координат на весь земной шар в виде наложения витков друг на друга за 12 часов.

Применяемый алгоритм оценки высоты снега [6] несложен и содержит две ветви. Сначала оценивается наличие глубокого снега по условиям:

$$T_{36H} < 245 \text{ К и } T_{36V} < 255 \text{ К, или } T_{10V} > T_{36V}, \text{ или } T_{10H} > T_{36H},$$

где $T_{NH/V}$ — это радиационная температура на частоте N горизонтальной (H) или вертикальной (V) поляризации. Если условия не выполняются, то оценивается наличие тонкого снега по выполнению условий:

$$T_{89V} \leq 255 \text{ К, и } T_{89H} \leq 265 \text{ К, и } T_{23V} > T_{89V}, \text{ и } T_{23H} > T_{89H}, \text{ и } T < 267 \text{ К,}$$

где $T = 58.08 - 0.39T_{18V} + 1.21T_{22V} - 0.37T_{36H} + 0.36T_{89H}$. Если условия наличия тонкого снега выполняются, то высота снежного покрова принимается равной 5 см. Иначе оценивается высота глубокого снежного покрова по формуле:

$$SD = f_f SD_f + (1 - f_f) SD_o$$

где f_f — доля площади, покрытая лесом, SD_f и SD_o — оценки высоты снега для лесистой и безлесной части пикселя:

$$SD_f = \frac{T_{18V} - T_{36V}}{\log_{10}(pol_{36})(1 - 0.6f_d)}$$

$$SD_o = \frac{T_{10V} - T_{36V}}{\log_{10}(pol_{36})} + \frac{T_{10V} - T_{18V}}{\log_{10}(pol_{18})}$$

Здесь f_d — плотность древостоя по карте покрытия растительности (Vegetation Continuous Fraction) Университета штата Мериленд, а pol_{36} и pol_{18} — поляризационные множители (разница между радиационной температурой вертикальной и горизонтальной поляризаций на 36 и 18 ГГц), помогающие в некоторой степени учитывать средний размер зёрен снега.

Запасы воды в снеге затем вычисляются с использованием карты плотности снега, построенной вычислением среднемноголетней плотности снега из [7, 8] для каждого класса снега карты сезонной классификации снега [9]. Причина первичного вычисления высоты снежного покрова, а не запасов воды в снеге, заключается в том, что количество наземных данных о высоте снежного покрова значительно больше, чем о запасах воды в снеге, что по мнению авторов алгоритма потенциально позволяет добиться большей точности.

Авторы алгоритма отмечают [6] потенциальные неучтённые или недоучтённые факторы, искажающие оценки по этому алгоритму, такие как: ослабление излучения в атмосфере, ослабление излучения высокой вертикальной растительностью, изменение плотности и грануляции снега со временем, влияние наличия в пределах пикселей мелких водных объектов, а также невозможности оценки высоты тающего снега. Так, ослабление излучения неучтёнными вариациями в оптической плотности атмосферы, приведённые к ошибке запасов воды в снеге, могут достигать 25–50% [10]. Применяемая методика учёта влияния древостоя снижает, но исключает полностью его влияние, то же относится и к учёту размера гранул с помощью поляризационных множителей. Влияние мелких озёр в пределах пикселей в принципе не учитывается, тогда как, фактически, их эффект для тундры и бореальных лесов имеет даже разный знак. Наличие тающего снега только приблизительно обнаруживается, в случае чего алгоритм просто не применяется.

Описание методики сравнения. Для оценки точности измерений запасов воды в снеге по данным прибора AMSR-2 использовались данные наземной съёмки с 96 снегомерных маршрутов и 11 снегомерных пунктов Красноярского края и бассейнов Енисея и Верхней Оби, всего с 94 метеостанций. Маршрутная снегомерная съёмка проводится каждую декаду в зимний период и каждые 5 суток в весенний. Вне графика обычно также отмечается дата схода снега. Для сравнения использовались только данные по запасам воды в снеге. Всего для сравнения использовано более 6398 наземных измерений за период с 2012–2017 гг.

Для сбора и обработки данных AMSR-2 была разработана автоматическая система с расчётом на её дальнейшее использование в оперативной практике. Собираемые данные накапливаются в базе данных под управлением СУБД PostgreSQL. Собираемая информация AMSR-2 включает за каждый момент наблюдения (дважды в сутки) матрицу 4x4 из 16 ближайших к каждой метеостанции узлов сетки, а также результаты пространственной билинейной и бикубической интерполяции в точке метеостанции. По ходу исследования система усложнялась добавлением новых видов обработки, например, таких как вычисление максимума, среднего и медианы в скользящем окне за 16 суток.

Результаты сравнения. В результате анализа полученных наборов данных было выявлено несколько основных особенностей данных AMSR-2, а именно:

- наличие провалов до нуля в данных среди зимнего сезона,
- неполное покрытие за одни сутки;
- ограничение сверху на максимальный обнаруживаемой снеготаяния;
- бесполезность пространственной интерполяции.

Наличие нулей в данных обусловлено вышеупомянутой чувствительностью к наличию воды на поверхности снега, в случае наличия которой метод полностью теряет чувствительность до нуля. Несмотря на наличие оценки применимости метода через эмпирическую оценку температуры, сам факт неприменимости метода в данных никак не отмечается. Соответственно, нули в данных могут появиться в любой момент, например, в период оттепели зимой. При этом они, естественно, не имеют смысла, как все другие данные AMSR-2, фиксирующие снижение снеготаяния. Таким образом, требуется обязательная внешняя проверка применимости данных AMSR-2, показывающих снижение запасов воды в снеге.

Ширина полосы захвата прибора AMSR-2 составляет около 1600 км, что не обеспечивает ежедневного покрытия всей территории земного шара. Для получения непрерывного временного ряда наблюдений на широтах меньше 51° необходимо использовать данные, как минимум, за двое суток. Учитывая склонность к занижению оценок при наличии снеготаяния, а также для целей определения максимального зимнего снеготаяния целесообразно применять функцию максимума из данных за двое суток.

Для метеостанций с большим зимними накапливаемыми снеготаяниями проявляется ограничение на максимальный снеготаяния, который может быть оценён по данным AMSR-2. В описании методики приводятся верхние оценки высоты снежного покрова, обнаруживаемые методом, в 1 м, что соответствует снеготаянию в 150–400 кг/м². И, действительно, максимальное зарегистрированное значение в окрестностях метеостанций по данным AMSR-2 составило 565 кг/м². Однако, фактически по результатам сравнения максимально обнаруживаемый снеготаяния по данным AMSR-2 для многоснежных метеостанций значительно ниже — в районе 75–200 кг/м² при фактических максимумах по наземным данным 200–950

кг/м². Общий вид соотношения максимумов спутниковых и наземных данных представлен на рисунке.

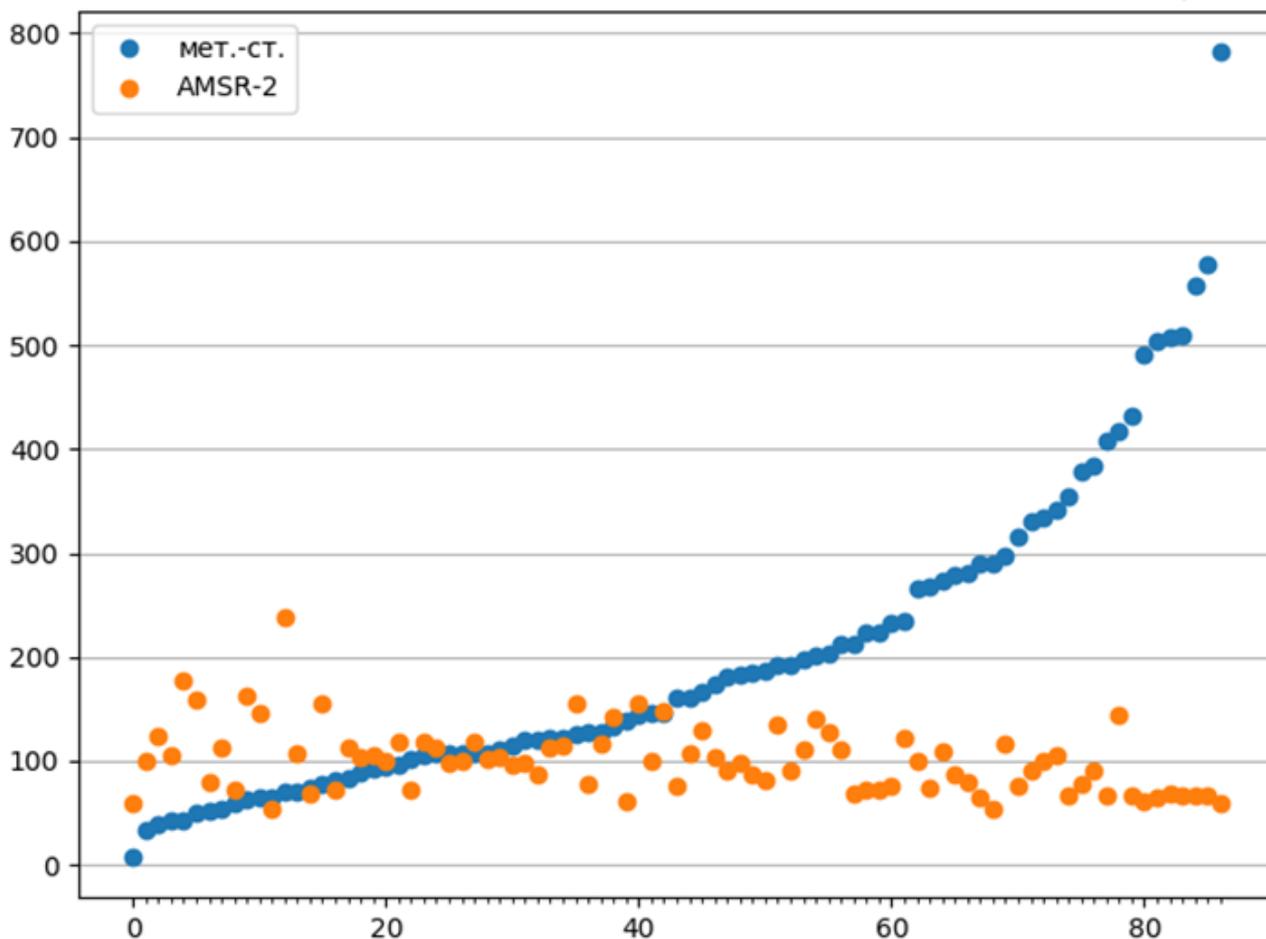


Рис. — Максимальные наблюдавшиеся снегозапасы (кг/м²) по спутниковым и наземным данным (по горизонтальной оси — ранг метеостанции по наземным данным).

Неприятным является также тот факт, что из самих данных AMSAR-2 признаки его ограничения никак не вытекают, и чтобы это ограничение обнаружить требуются независимые наземные данные. Поэтому из дальнейшего исследования пришлось исключить метеостанции, для которых наблюдавшийся максимум оценки снегозапаса по AMSAR-2 не достигал наблюдаемых максимумов по наземным данным. После исключения осталось 34 пункта из 106. Карта распределения оставленных и исключённых метеостанций не показывает какого-либо значимого географического фактора, по которому можно было бы без использования наземных данных судить о применимости спутниковых оценок снегозапасов.

Линейные регрессионные состоятельные модели оценки наземных данных по AMSAR-2, отдельные для каждой метеостанции, построены для 24 станций из 34 по условию наличия 20 и более пар точек. Независимой переменной считались данные AMSAR-2, прошедшие фильтрацию медианой в окне 16 суток (привязанную к 8 суткам окна) и интерполированные билинейной интерполяцией в точку метеостанции по ближайшим 4 узлам. Квадрат коэффициента корреляции этих моделей (R^2) составил от 0,29 до 0,76, для 50% станций — более 0,46. Линейный коэффициент пропорциональности в моделях от 0,156 до 0,86, константа от – 7,29 до 41,86 кг/м². Попытка использовать в качестве данных не интерполированные данные

узлов, показала, что всегда можно найти узел, дающий более точную модель, чем получается построить по интерполированным данным. В случае поиска наилучшего узла, обеспечивающего лучшую корреляцию, квадрат коэффициента корреляции этих моделей составил от 0,33 до 0,83, для 50% станций — более 0,55. В таблице для примера приведены квадраты коэффициентов корреляции в узлах интерполяции для метеостанции Курагино, для которой он равен 0,756 для линейной интерполяции по 4 узлам в точку метеостанции и 0,747 — для бикубической интерполяции (север вверху, м.-ст. находится между 4 внутренних узлов). Видно, что наибольший квадрат коэффициента корреляции 0,825 (выделен в табл.) наблюдается даже не в ближайшем к метеостанции узле.

Таблица — Квадраты коэффициента корреляции в узлах интерполяции м.-ст. Курагино.

0,757	0,688	0,577	0,466
0,814	0,679	0,629	0,528
0,797	0,807	0,792	0,710
0,825	0,818	0,790	0,657

Таким образом, процедура пространственной интерполяции представляется бесполезной из-за сильной неоднородности поверхности внутри площадки пикселя в несколько километров в диаметре. Получается, что окрестные пиксели могут иметь случайно более близкие интегральные оценки снегозапаса к точечным наземным наблюдениям, чем результаты формальной интерполяции по ближайшим узлам.

Для двух станций не удалось построить состоятельную модель даже при наличии более 20 пар данных. Для метеостанции Кресты Таймырские коэффициент пропорциональности получился отрицательным, а квадрат коэффициента корреляции 0,139, для Тембенчи — $R^2 = 0,046$. Облако точек на скаттерограмме у них, фактически, круглое и не имеет выраженной ориентации. Это можно объяснить случайным фактическим распределением типа поверхности и рельефа местности в пределах пикселей AMSR-2. Так, например, Кресты Таймырские расположены на берегу р. Хатанга в окружении тундровых озёр, негативное влияние которых отмечалось в литературе выше.

Заключение. Таким образом использование данных микроволнового радиометра AMSR-2, установленного на КА GCOM-W1, для оценки запасов воды в снеге возможно только в период снегонакопления и невозможно в период снеготаяния. Для обеспечения полного покрытия территории, в том числе для широты меньше 51° , необходимо использовать, как минимум, данные за двое суток. При необходимости связать данные о запасах воды в снеге с AMSR-2 с данными наземных измерений требуется построение отдельной регрессионной зависимости для каждого пункта наземных измерений с подбором узла сетки данных AMSR-2 с наибольшим коэффициентом корреляции в качестве независимой переменной. Построение регрессионной зависимости не всегда возможно по условиям местности вокруг метеостанции. Также максимальные возможные снегозапасы в точке метеостанции не должны превышать величины около 200 кг/м^2 , выше которой снегозапасы по данным AMSR-2 оценить невозможно по условиям применимости методики. Фактические максимальные регистрируемые снегозапасы в данном месте необходимо определять по наземным данным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Matson, M. NOAA satellite snow cover data//Paleogeography and Paleoecology, 1995. №90. С. 213–218.
2. Kunzi K F, Patil S, Rott H Snow-cover parameters retrieved from Nimbus-7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) data//IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing GE20. 1982. С. 452–467.
3. Chang A. T. C., Foster J. L., Hall D. K. Nimbus-7 SMMR derived global snow cover parameters//Ann. Glaciol., 1987. №9. С. 39–44.
4. Kelly, R.E.J. and A.T.C. Chang Development of a passive microwave global snow depth retrieval algorithm for SSM/I and AMSR-E data//Radio Science. 2003. №38.
5. Kelly, R. The AMSR-E snow depth algorithm: description and initial results//Journal of the Remote Sensing Society of Japan. 2009. №29(1). С. 307-317.
6. Descriptions of GCOM-W1 AMSR2 Level 1R and Level 2 Algorithms. Japan Aerospace Exploration Agency Earth Observation Research Center. 2013. http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/data/doc/NDX-120015A.pdf (дата обращения 13.07.2018).
7. Brown R. D., Braaten R. O. Spatial and temporal variability of Canadian monthly snow depths, 1946-1995//Atmosphere-Ocean. 1998. №36. С. 37-45.
8. Krenke, A. Former Soviet Union hydrological snow surveys, 1966- 1996. Edited by NSIDC. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology. Digital media.
9. Sturm. M., Taras B., Liston G. ., Derksen C., Jonas T., Lea J. Estimating Snow Water Equivalent Using Snow Depth Data and Climate Classes//Journal of Hydrometeorology. 2010. №11, С. 1380-1394. <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2010JHM1202.1> (дата обращения 30.05.2019).
10. Wang, J., & Tedesco, M. Identification of atmospheric influences on the estimation of snow water equivalent from AMSR-E measurements//Remote Sensing of Environment. 2007. №111(2-3). С. 398-408.