

Восстановление интегрального паросодержания атмосферы по данным прибора МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2) над поверхностью океана

Е. В. Пашинов

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail : pashinove@mail.ru*

Микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ имеет каналы вертикальной и горизонтальной поляризации на частотах 23,8 и 18,7 ГГц, что позволяет применить разность поляризационных сигналов для восстановления интегрального паросодержания атмосферы. Подобные методики ранее были разработаны для прибора AMSR-E, однако параметры зондирования, угол встречи с поверхностью у МТВЗА-ГЯ существенно отличаются от AMSR-E. Это потребовало дополнительных исследований и расчёта новых коэффициентов в регрессионном соотношении. Получены формулы, позволяющие рассчитывать значения интегрального паросодержания атмосферы по данным яркостных температур прибора МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2) на каналах 18,7 ГГц (V, H) и 23,8 ГГц (V, H). Показана хорошая корреляция между результатами расчётов по полученному регрессионному соотношению и радиозондовыми измерениями. Проведён анализ, продемонстрировавший высокую корреляцию расчётов по данным МТВЗА-ГЯ с продуктом прибора GMI, предоставляемым Remote Sensing Systems. Оценка результатов восстановления паросодержания атмосферы по разработанной методике указывает на возможность измерений с относительной ошибкой менее 10 % в диапазоне значений от 10 до 60 мм.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, интегральное паросодержание, МТВЗА-ГЯ, радиометрические измерения, восстановление

Одобрена к печати: 10.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235

Введение

Водяной пар — один из важнейших элементов, участвующих в формировании климата нашей планеты. Мониторинг интегрального содержания водяного пара атмосферы — необходимая составляющая для всех видов прогноза погоды (Kämpfer, 2013). Информация о распределении глобальных полей водяного пара позволяет оценить энергетические характеристики катастрофических атмосферных процессов (Ермаков и др., 2014; Trenberth, Caron, 2001). Высокие значения интегрального водяного пара в атмосфере могут служить триггером для зарождения и интенсификации тропических циклонов (Шарков и др., 2012). Таким образом, измерение и мониторинг содержания водяного пара в атмосфере Земли является актуальной научной задачей, для решения которой в настоящее время активно применяются методы спутниковой микроволновой радиометрии.

Для восстановления интегрального паросодержания атмосферы обычно используются пассивные микроволновые измерения в окрестности линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц. Преимуществом таких измерений является всепогодность, в отличие, например, от инфракрасных измерений, которые невозможно проводить в облачности. Существенным ограничением для микроволновых методик обычно служит сильная изменчивость излучательных характеристик подстилающей поверхности. Так, например, стандартные методы практически не позволяют проводить измерения интегрального паросодержания над поверхностью суши.

Настоящая работа основана на методике, изложенной в статье (Deeter, 2007), которая использует разность радиометрических сигналов на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациях на частотах 18,7 и 23,8 ГГц $\Delta T_{я} = T_{яV} - T_{яH}$. Дифференциальный характер измерений позволяет уменьшить влияние изменчивости излучательных характеристик

подстилающей поверхности и повысить точность восстановления интегрального паросодержания атмосферы. Авторы работы (Deeter, 2007) применили свою методику к данным прибора AMSR-E, проработавшего с 2002 по 2011 г. на спутнике Aqua (Kawanishi et al., 2003). Достоинством этого метода является тот факт, что он позволяет восстанавливать интегральное паросодержание атмосферы не только над поверхностью океана, но и над поверхностью суши. Отметим, что большинство других спутниковых микроволновых радиометров не имеет канала горизонтальной поляризации на частоте 23,8 ГГц.

В 2014 г. был запущен спутник «Метеор-М» № 2, на борту которого был установлен отечественный микроволновый прибор МТВЗА-ГЯ с каналами вертикальной и горизонтальной поляризации на частотах 18,7 и 23,8 ГГц (Болдырев и др., 2008). Однако его параметры сканирования отличаются от параметров прибора AMSR-E. В частности, угол встречи с землей у прибора МТВЗА-ГЯ составляет 65° против 55° у прибора AMSR-E. Задачей настоящей работы является проверка возможности применения методики, описанной в статье (Deeter, 2007), к данным прибора МТВЗА-ГЯ и получение регрессионного соотношения, позволяющего проводить восстановление интегрального паросодержания атмосферы по его данным.

До настоящего времени в литературе не было предложено простого алгоритма для восстановления интегрального паросодержания атмосферы на основе данных МТВЗА-ГЯ. В результате сотрудничества Отдела исследования Земли из космоса Института космических исследований РАН и НТЦ «Космонит» появилась возможность получить результаты измерений прибора МТВЗА-ГЯ и создать алгоритм восстановления интегрального паросодержания атмосферы на основе его данных.

Теоретическое обоснование

Использование разности сигналов на двух поляризациях для восстановления параметров атмосферы было предложено в работе (Greenwald et al., 1997). Метод нормированной поляризационной разности (Normalized polarization difference) предлагалось использовать для прибора SSM/I с целью восстановления водозапаса облачности над сушей. Рассмотрим основные соотношения, обосновывающие возможность применения данного метода.

Спутниковый сигнал для отдельной поляризации на какой-либо частоте можно представить следующим образом:

$$T_{я,ВН} = \varepsilon_{ВН} T_S \cdot e^{-\tau} + T_{я,ав} + (1 - \varepsilon_{ВН}) T_{я,ан} \cdot e^{-\tau} + (1 - \varepsilon_{ВН}) T_p \cdot e^{-2\tau}, \quad (1)$$

где ε — коэффициент излучения подстилающей поверхности; T_S — температура подстилающей поверхности; τ — интегральное поглощение атмосферы; $T_{я,ав}$ — восходящее излучение атмосферы; $T_{я,ан}$ — нисходящее излучение атмосферы; T_p — космическое реликтовое излучение.

Видно, что выражение (1) сильно зависит от излучательных характеристик подстилающей поверхности, которые достаточно изменчивы и зачастую неизвестны при дистанционном зондировании. Чтобы частично решить данную проблему, в работе (Greenwald et al., 1997) предлагается вычитать сигналы, полученные на каналах вертикальной и горизонтальной поляризации. Разность сигналов на вертикальной и горизонтальной поляризациях можно представить в виде:

$$\Delta T_{я} = T_{я,В} - T_{я,Н} = (\varepsilon_V - \varepsilon_H) T_S \cdot e^{-\tau} - (\varepsilon_V - \varepsilon_H) T_{я,ан} \cdot e^{-\tau} - (\varepsilon_V - \varepsilon_H) T_p \cdot e^{-2\tau}. \quad (2)$$

Учитывая малую величину последнего слагаемого по сравнению с предыдущими, уравнение (2) можно упростить:

$$\Delta T_{я} = \Delta\varepsilon \cdot e^{-\tau} (T_S - T_{я,ан}). \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что разность сигналов на двух поляризациях зависит уже от разности излучательных характеристик поверхности ($\Delta\varepsilon$) на соответствующих поляризациях, которая менее изменчива, чем сами коэффициенты излучения, и может быть учтена при

решении обратной задачи. Так, например, при изменении температуры воды на 10 К на частоте 23,8 ГГц и при угле падения 65° ε_V изменяется на 4,2 %, а ε_H — на 0,8 %, $\Delta\varepsilon$ при этом изменяется на 1,1 % (Кутуза, 2016).

Использование выражения (3) для решения обратной задачи по восстановлению параметров атмосферы довольно затруднительно, поскольку в нём нет явной зависимости от этих параметров. В работе (Deeter, Vivekanandan, 2006) была проведена параметризация уравнения (3) относительно интегрального паросодержания атмосферы (PWV) и водозапаса облачности (LWP) для каналов прибора AMSR-E:

$$\Delta T_{я} \approx \Delta\varepsilon \cdot \exp(\beta_0 + \beta_1 T_S + \beta_2 LWP + \beta_3 PWV), \quad (4)$$

где β — коэффициенты регрессии, зависящие от частоты.

Авторами были проведены модельные расчёты, которые показали, что зависимость величины $\ln(\Delta T_{я}/\Delta\varepsilon)$ от интегрального паросодержания атмосферы и водозапаса облачности действительно имеет линейный характер.

Для повышения точности решения обратной задачи автор предлагает использовать сигналы $\Delta T_{я}$, измеренные на двух частотах, и решать систему из двух уравнений (4) относительно интегрального паросодержания атмосферы и водозапаса облачности. Для восстановления интегрального паросодержания предлагается использовать сигналы $\Delta T_{я}$ на частотах 23,8 и 18,7 ГГц, поскольку величина $\Delta T_{я,24}$ существенно более чувствительна к паросодержанию атмосферы, чем $\Delta T_{я,19}$, и они обе не сильно зависят от водозапаса облачности. Решение такой системы для интегрального паросодержания атмосферы имеет следующий вид:

$$PWV = \frac{\ln\left(\frac{\Delta T_{я,24}}{\Delta T_{я,19}}\right) - \ln\left(\frac{\Delta\varepsilon_{24}}{\Delta\varepsilon_{19}}\right) - (\beta_0^{24} - \beta_0^{19}) - (\beta_1^{24} - \beta_1^{19})T_S - (\beta_2^{24} - \beta_2^{19})LWP}{\beta_3^{24} - \beta_3^{19}}, \quad (5)$$

где $\beta_0^{24} = \beta_0^{19} = 4,39$; $\beta_1^{24} = 0,00414$; $\beta_1^{19} = 0,00423$; $\beta_2^{24} = -0,45$; $\beta_2^{19} = -0,275$; $\beta_3^{24} = -0,0179$; $\beta_3^{19} = -0,00585$.

Однако все приведённые выше выражения не учитывают в явном виде волнение на поверхности океана, которое может давать значительный вклад в яркостную температуру системы «океан — атмосфера». Вклад волнения в яркостную температуру, регистрируемую на спутнике, учитывают введением в уравнения для гладкой поверхности величины ветрового контраста $T_k = T_{я,вз} - T_{я,гл}$. С учётом этого вклада можно переписать выражение (4) следующим образом:

$$\Delta T_{я} \approx \Delta\varepsilon \cdot \exp(\beta_0 + \beta_1 T_S + \beta_2 LWP + \beta_3 PWV) + \Delta T_k, \quad (6)$$

где $\Delta T_k = T_{к,в} - T_{к,г}$.

Выражение (5), соответственно, будет иметь следующий вид:

$$PWV = \frac{\ln\left(\frac{\Delta T_{я,24} - \Delta T_{к,24}}{\Delta T_{я,19} - \Delta T_{к,19}}\right) - \ln\left(\frac{\Delta\varepsilon_{24}}{\Delta\varepsilon_{19}}\right) - (\beta_0^{24} - \beta_0^{19}) - (\beta_1^{24} - \beta_1^{19})T_S - (\beta_2^{24} - \beta_2^{19})LWP}{\beta_3^{24} - \beta_3^{19}}. \quad (7)$$

Первое слагаемое в числителе (7) можно представить в виде:

$$\ln\left(\frac{\Delta T_{я,24} - \Delta T_{к,24}}{\Delta T_{я,19} - \Delta T_{к,19}}\right) = \ln\left(\frac{\Delta T_{я,24}}{\Delta T_{я,19}}\right) + \ln\left[1 + \left(\frac{\Delta T_{к,19}}{\Delta T_{я,19}} - \frac{\Delta T_{к,24}}{\Delta T_{я,24}}\right)\right]. \quad (8)$$

При интегральном паросодержании атмосферы 40 мм и скорости приповерхностного ветра 10 м/с $\Delta T_{я,24} \approx 50$ К, $\Delta T_{я,19} \approx 100$ К, $\Delta T_{к,24} \approx -10$ К, $\Delta T_{к,19} \approx -20$ К (Кутуза, 2016). Подставляя приведённые выше значения, получим: $\left(\frac{\Delta T_{к,19}}{\Delta T_{я,19}} - \frac{\Delta T_{к,24}}{\Delta T_{я,24}}\right) < 0,05$, что существенно меньше,

чем $\ln \left(\frac{\Delta T_{я,24}}{\Delta T_{я,19}} \right)$. Поэтому вторым слагаемым в выражении (8) можно пренебречь и использовать приближение:

$$\ln \left(\frac{\Delta T_{я,24} - \Delta T_{к,24}}{\Delta T_{я,19} - \Delta T_{к,19}} \right) \approx \ln \left(\frac{\Delta T_{я,24}}{\Delta T_{я,19}} \right). \quad (9)$$

Приведённые выше оценки сделаны на основе модельных расчётов, которые не охватывают всех возможных вариаций метеоусловий, и практические результаты могут отличаться, но предполагается, что ошибка восстановления паросодержания атмосферы за счёт ветрового вклада не превышает 5 %. Таким образом, будем считать, что выражение (5) справедливо и для взволнованной поверхности океана.

Соотношение (5) можно упростить, полагая, что величина $\Delta \epsilon$ имеет слабую зависимость от частоты и величина $\ln(\Delta \epsilon_{24}/\Delta \epsilon_{19})$ пренебрежимо мала. Расчёты показывают, что для гладкой водной поверхности $\ln(\Delta \epsilon_{24}/\Delta \epsilon_{19}) \approx 0,015$, что составляет примерно 1 % от величины $\ln(\Delta T_{я,24}/\Delta T_{я,19})$. Также в работе (Deeter, 2007) предлагается пренебречь вкладом водозапаса облачности в выражении (5). Если считать водозапас облачности равным 0,5 мм (что является довольно большим значением), то с учётом коэффициентов β_2 получим, что вклад такого водозапаса в уравнение (5) сравним с изменением $\ln(\Delta T_{я,24}/\Delta T_{я,19})$ примерно на 5 %. Соответственно, можно ожидать такой же относительной ошибки восстановления паросодержания атмосферы, если водозапас облачности в выражении (5) не учитывать.

Таким образом, упрощённая версия алгоритма для прибора AMSR-E оперирует только яркостными температурами на каналах 18,7 ГГц (V, H) и 23,8 ГГц (V, H) и информацией о температуре подстилающей поверхности:

$$PWW = \frac{\ln \left(\frac{\Delta T_{я,24}}{\Delta T_{я,19}} \right) - (\beta_0^{24} - \beta_0^{19}) - (\beta_1^{24} - \beta_1^{19}) T_s}{\beta_3^{24} - \beta_3^{19}}. \quad (10)$$

Это соотношение (10) было взято за основу при разработке алгоритма для МТВЗА-ГЯ. Основное отличие прибора МТВЗА-ГЯ от прибора AMSR-E — существенно больший угол встречи с Землёй: 65° по сравнению с 55°. Очевидно, что коэффициенты β в выражении (10) для такого угла будут другими.

В работе (Deeter, 2007) отмечается, что зависимость (10) от температуры подстилающей поверхности очень слаба и ошибка значения PWW при погрешности измерения температуры поверхности в 10 К составит всего 0,07 мм, поэтому для упрощения алгоритма имеет смысл заменить величину T_s на константу. Учитывая перечисленные допущения, а также линейную зависимость (10) от $\ln(\Delta T_{я,24}/\Delta T_{я,19})$, итоговое выражение для восстановления паросодержания атмосферы можно представить в виде:

$$PWW_{\text{МТВЗА}} = a \cdot \ln \left(\frac{\Delta T_{я,24}}{\Delta T_{я,19}} \right) + b. \quad (11)$$

При этом коэффициенты a и b подбираются на основе моделирования или сравнения спутниковых данных с данными независимых измерений паросодержания атмосферы.

Результаты

Для подбора коэффициентов a и b был проведён анализ данных МТВЗА-ГЯ совместно с результатами измерений вертикального профиля влажности на шести малых островах Тихого и Атлантического океана, полученных на сайте университета Вайоминга (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). НТЦ «Космонит» были предоставлены данные измерений

яркостных температур прибора МТВЗА-ГЯ за 2015–2016 гг. Измерения спутника были совмещены с измерениями метеозондов с условием, что координаты центра пикселя спутника отличаются от координат запуска зонда менее чем на 1° и время пролёта спутника отличается от времени запуска зонда менее чем на 10 мин. При данных условиях были получены 742 соответствующих набора данных.

Для этого набора данных методом наименьших квадратов были получены коэффициенты в соотношении (11): $a = -53,1915$ и $b = -0,2236$. На *рис. 1* представлена диаграмма сравнения паросодержания атмосферы PWV , рассчитанного на основе радиозондовых измерений, и величины $PWV_{\text{МТВЗА}}$, полученной по формуле (11) на базе спутниковых данных. На рисунке видно, что спутниковые результаты с хорошей точностью соответствуют наземным измерениям. Среднее квадратичное значение относительной погрешности восстановления паросодержания атмосферы составило 9,4 %. Среднее квадратичное значение абсолютной погрешности восстановления по всей выборке составило 4,7 мм и среднее значение погрешности — 0,0332 мм. Коэффициент линейной корреляции между восстановленными и зондовыми значениями интегрального паросодержания $R = 0,945$.

На *рис. 1* видно, что некоторые точки сильно выбиваются из общей зависимости и ошибка восстановления для них превышает 10 мм. Более детальный анализ данных показал, что такие отклонения вызваны наличием сильной облачности с водозапасаем более 0,5 мм и дождём, которые приводят к сильному рассеянию измеряемого сигнала. Возможно, в будущем можно будет скорректировать данный эффект, добавив в алгоритм учёт влияния водозапаса облачности.

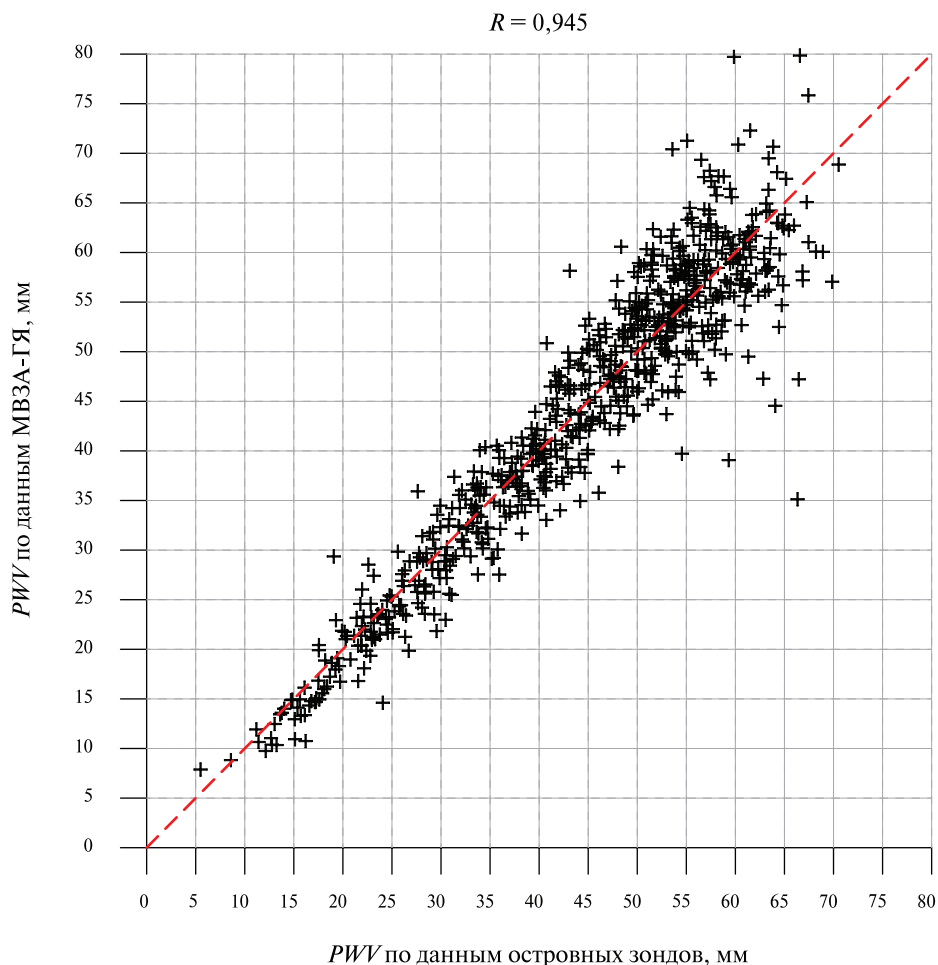


Рис. 1. Диаграмма рассеяния между восстановленными значениями интегрального паросодержания по формуле (11) и подспутниковыми зондовыми измерениями

Сравнение результатов восстановления паросодержания по данным МТВЗА-ГЯ с продуктом спутника GPM

В настоящее время интегральное паросодержание атмосферы восстанавливают на основе данных множества спутниковых микроволновых приборов и чаще всего конечный результат предоставляют пользователю в виде продукта, представляющего собой изображения в псевдоцветах или массивы с данными о паросодержании, которые наложены на регулярную прямоугольную или полярную сетку координат с различным усреднением по времени. Одна из передовых организаций, занимающихся тематической обработкой спутниковых данных, — Remote Sensing Systems (RSS) — предлагает продукт с интегральным паросодержанием атмосферы по данным нескольких наиболее актуальных на сегодняшний день спутниковых микроволновых приборов. Данные представляются в виде массивов за одни сутки, наложенных на регулярную прямоугольную сетку координат с разрешением $0,25^\circ$ отдельно для нисходящих и восходящих витков спутников. Чтобы провести сравнение результатов восстановления интегрального паросодержания по МТВЗА-ГЯ с продуктом RSS, было проведено наложение данных МТВЗА-ГЯ формата Swath (спутниковые треки) на сетку координат, соответствующую данным RSS. В результате сравнение данных проводилось на единой сетке координат.

Из базы данных RSS, которая предоставляет информацию об интегральном паросодержании атмосферы, был выбран спутник и микроволновый прибор, данные которого наилучшим образом совпадают по пространству и времени с данными прибора МТВЗА-ГЯ. В результате анализа для сравнения было решено использовать данные прибора GMI (GPM Microwave Imager) со спутника GPM (Global Precipitation Measurement). Орбита этого спутника более чем в два раза ниже орбиты спутника «Метеор-М» № 2, что приводит к периодическим пересечениям их подспутниковых треков. Микроволновый прибор GMI проводит измерения на частотных каналах, близких к каналам прибора МТВЗА-ГЯ (таблица) (Draper et al., 2015). По данным Всемирной метеорологической организации, GMI является источником перво-степенной значимости об интегральном паросодержании атмосферы.

Частотные каналы МТВЗА-ГЯ и GMI

Рабочие частоты GMI, ГГц	Рабочие частоты МТВЗА-ГЯ, ГГц
10,65 (V, H)	10,6 (V, H)
18,7 (V, H)	18,7 (V, H)
23,8 (V)	23,8 (V, H)
36,5 (V, H)	36,5 (V, H)

Неплохое совпадение данных МТВЗА-ГЯ и GMI произошло 4 августа 2015 г. для полуденного (начало трека в 12:00 UTC) восходящего трека GMI и полуденного нисходящего трека. На рис. 2 (см. с. 231) полоса данных GMI показана жёлтым цветом, а полоса МТВЗА-ГЯ — зелёным; область пересечения данных соответствующих приборов отмечена красным цветом. Поскольку треки имеют противоположное направление, то для экваториальных широт расхождение во времени наблюдения составило 18 мин, а при приближении к арктическим широтам расхождение составило уже 1 ч. Абсолютное время регистрации данных показано на рис. 2 стрелками для двух пикселей в нижней и верхней частях области пересечения.

В зоне пересечения спутниковых треков оказалось 8042 пикселя данных каждого из приборов. На рис. 3 (см. с. 231) слева представлены результаты восстановления интегрального паросодержания атмосферы в области пересечения треков по данным GMI (RSS), а справа — данные МТВЗА-ГЯ, восстановленные по формуле (11). На рисунке видна хорошая корреляция результатов. Для более подробного сравнения для этого набора данных был проведён корреляционный анализ, результаты которого представлены на рис. 4 (см. с. 232).

Коэффициент линейной корреляции для всего набора данных составил 0,9884. Средне-квадратическое отклонение (СКО) между данными, полученными по двум приборам, составило 1,73 мм. На *рис. 4* видно, что точки со значениями паросодержания до 30 мм превышают паросодержание примерно на 2–3 мм.

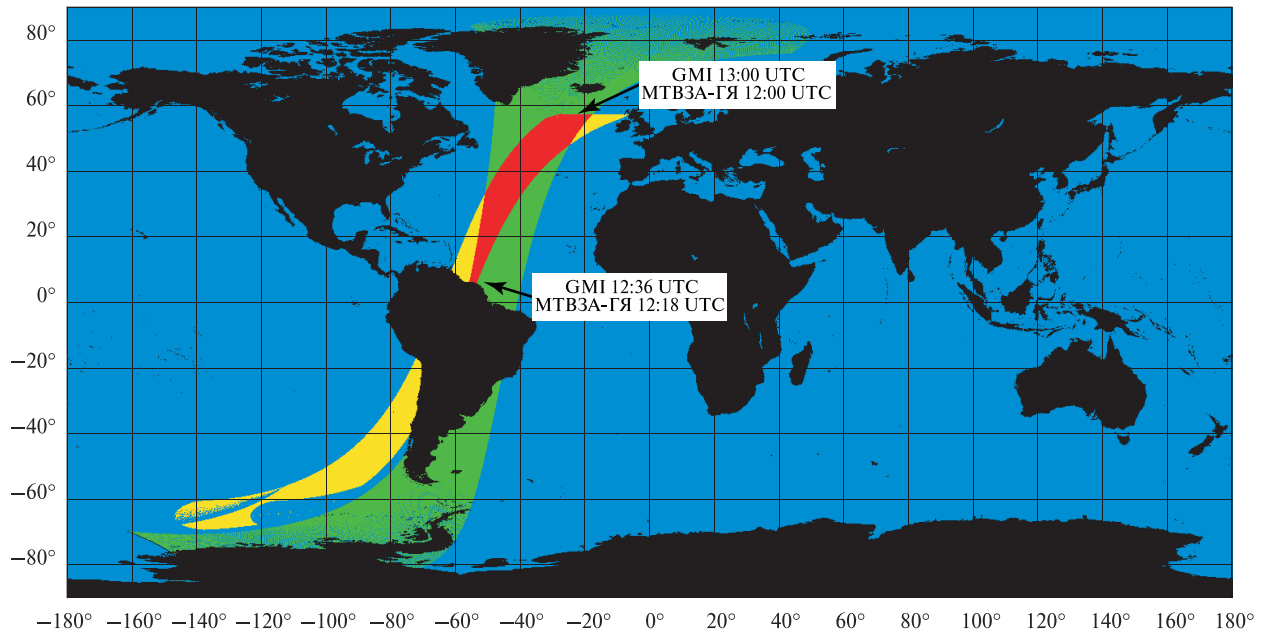


Рис. 2. Спутниковые треки приборов GMI и МТВЗА-ГЯ 04.08.2015 начиная с 12:00 UTC: восходящий трек GMI (жёлтый цвет); нисходящий трек МТВЗА-ГЯ (зелёный цвет); область совпадения двух треков (красный цвет). Стрелками отмечены совпавшие пиксели двух приборов и время регистрации сигналов в них

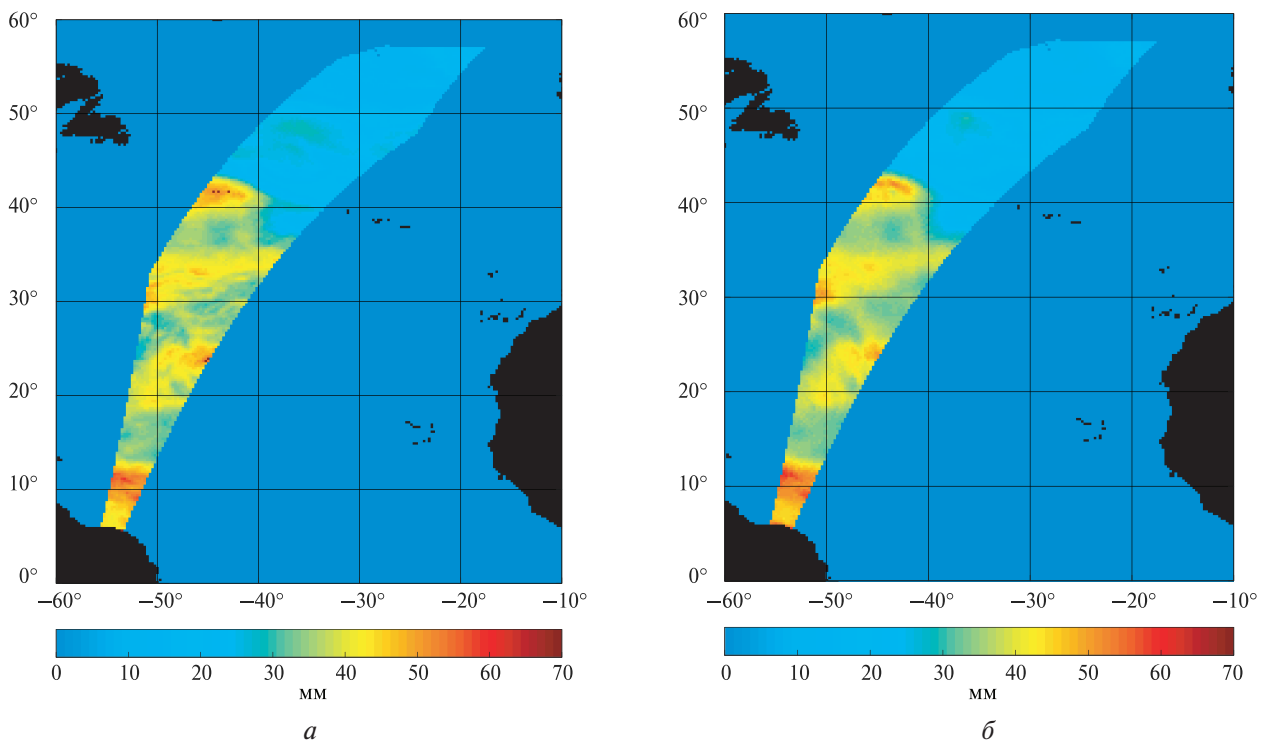


Рис. 3а, б. Интегральное паросодержание атмосферы в зоне пространственно-временного совпадения данных двух спутников: *а* — по данным GMI (RSS); *б* — по данным МТВЗА-ГЯ, формула (11) (рисунок *в* — на с. 232)

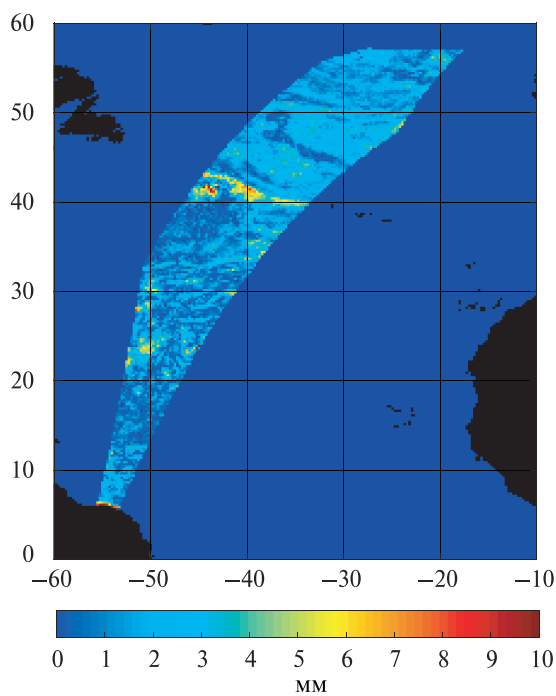


Рис. 3в — модуль разности изображений а и б

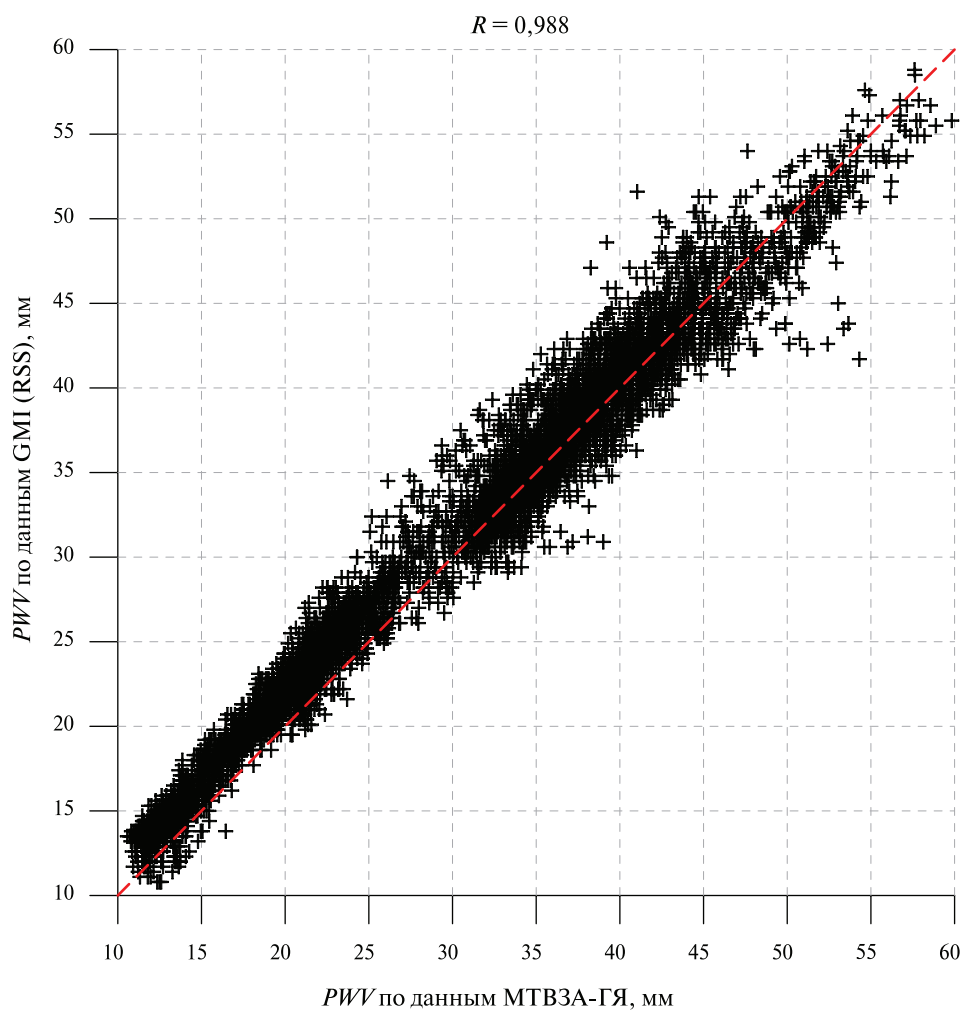


Рис. 4. Диаграмма рассеяния для значений интегрального паросодержания, полученных по данным МТВЗА-ГЯ и данным прибора GMI (RSS). Пунктир — линия идеального совпадения результатов

Это может быть вызвано тем, что при наложении данных с восходящего и нисходящего витка двух спутников расхождение во времени наблюдения пикселя увеличивается. Наибольшее количество точек с малым паросодержанием (до 30 мм) как раз находится в области с наибольшим расхождением по времени. Ещё одной причиной такого смещения может быть малое количество точек в данной области значений паросодержания, которые учитывались при подборе коэффициентов регрессии в выражении (11) (см. *рис. 1*). По-видимому, данная выборка (см. *рис. 1*) не имеет достаточной статистической значимости в области малых значений паросодержания. Однако этот недостаток можно устранить в будущем путём обработки дополнительного набора подспутниковых данных.

На *рис. 4* имеются несколько точек, выбивающихся из общей зависимости. Вероятнее всего, такие отклонения вызваны наличием осадков и сильной облачности в области наблюдений. В будущем для обеспечения всепогодности и более высокой точности в алгоритм восстановления интегрального паросодержания, по-видимому, необходимо добавить коррекцию с учётом водозапаса облачности.

Заключение

В результате проведённых исследований было получено регрессионное соотношение, позволяющее рассчитывать значения интегрального паросодержания атмосферы по данным яркостной температуры прибора МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2) на каналах 18,7 ГГц (V , H) и 23,8 ГГц (V , H). Показана хорошая корреляция между результатами расчётов по полученному регрессионному соотношению и радиозондовыми измерениями. Также проведён анализ, продемонстрировавший высокую корреляцию расчётов по данным МТВЗА-ГЯ с продуктом прибора GMI, предоставляемым Remote Sensing Systems.

При использовании полученного в ходе работы соотношения можно ожидать восстановление значений интегрального паросодержания по данным прибора МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2) с относительной ошибкой менее 10 % в диапазоне значений от 10 до 60 мм. Следует принимать во внимание, что в представленном методе не учитывается информация о водозапасе облачности в момент измерений. Есть основания полагать, что дальнейшее усложнение методики и использование в ней информации о водозапасе облачности позволит улучшить результаты восстановления.

Отметим, что существует теоретическая возможность восстановления интегрального паросодержания атмосферы по данным МТВЗА-ГЯ над поверхностью суши. Эту задачу планируется исследовать в будущем.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-02-01009).

Автор выражает признательность И. В. Чёрному за сотрудничество и предоставление данных измерений прибора МТВЗА-ГЯ, а также В. В. Стерлядкину и Е. А. Шаркову за участие в обсуждении полученных результатов.

Литература

1. Болдырев В. В., Горобец Н. Н., Ильгасов П. А., Никитин О. В., Панцов В. Ю., Прохоров Ю. Н., Стрельников Н. И., Стрельцов А. М., Черный И. В., Чернявский Г. М., Яковлев В. В. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 243–248.
2. Ермаков Д. М., Шарков Е. А., Чернушич А. П. Оценка тропосферных адвективных потоков скрытого тепла над океаном при анимационном анализе радиотепловых данных спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2014. № 5. С. 32–38.
3. Кутуза Б. Г., Данилычев М. В., Яковлев О. И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2016. 336 с.

4. Шарков Е. А., Шрамков Я. Н., Покровская И. В. Повышенное содержание водяного пара в атмосфере тропических широт как необходимое условие генезиса тропических циклонов // Исследование Земли из космоса. 2012. № 2. С. 73–82.
5. Deeter M. N. A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. L02815.
6. Deeter M. N., Vivekanandan J. New dual-frequency microwave technique for retrieving liquid water path over land // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. D15209.
7. Draper D. W., Newell D., Wentz F. J., Krimchansky S., Skofronick-Jackson G. M. The Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI): Instrument overview and early on-orbit performance // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. V. 8. Iss. 7. P. 3452–3462.
8. Greenwald T. J., Combs C. L., Jones A. S., Randel D. L., Haar T. V. Further developments in estimating cloud liquid water over land using microwave and infrared satellite measurements // J. Applied Meteorology. 1997. V. 36. P. 389–405.
9. Kawanishi T., Sezai T., Ito Y. The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 2003. V. 41. P. 184–194.
10. Kämpfer N. Monitoring Atmospheric Water Vapour: Ground-Based Remote Sensing and In-situ Methods. ISSI Scientific Report Series 10. N. Y.: Springer-Verlag, 2013. 328 p.
11. Trenberth K. E., Caron J. M. Estimates of Meridional Atmosphere and Ocean Heat Transports // J. Climate. 2001. V. 14. No. 16. P. 3433–3443.

Retrieval of integrated water vapor content of the atmosphere over the ocean using MTVZA-GY (Meteor-M No. 2) data

E. V. Pashinov

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: pashinove@mail.ru*

Availability of vertical and horizontal polarization channels at frequencies of 23.8 and 18.7 GHz in the MTVZA-GY instrument allows applying polarization difference technique to retrieve the integrated water vapor content of the atmosphere. Similar techniques have been already developed for AMSR-E instrument. The paper proposes an adaptation of such a technique described in (Deeter, 2007) for MTVZA-GY data. It has required additional investigation and deriving new coefficients for the regression relation. A good correlation between the results of the calculations by the obtained regression relation and weather balloon data has been demonstrated. Also, an analysis showed a good correlation of the calculations based on MTVZA-GY data and the GMI product provided by Remote Sensing Systems. Evaluation of the results of integrated water vapor content retrieval using the developed technique indicates the possibility of measurement with a relative error of less than 10 % in the range of 10 to 60 mm.

Keywords: remote sensing, integrated water vapor content, MTVZA-GY, microwave sounding, retrieving

Accepted: 10.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235

References

1. Boldirev V. V., Grobets N. N., Ilgasov P. A., Nikitin O. V., Pantsov V. U., Prohorov U. N., Strelnikov N. I., Streltsov A. M., Cherniy I. V., Cherniavskiy G. M., Yakovlev V. V., Sputnikovyi mikrovolnovyi skaner/zondirovshchik MTVZA-GY (Satellite microwave imager/sounder MTVZA-GY), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Issue 5, No. 1, pp. 243–248.

2. Ermakov D. M., Sharkov E. A., Chernushich A. P., Otsenka troposfernykh advektivnykh potokov skrytogo tepla nad okeanom pri animatsionnom analize radioteplovykh dannykh sputnikovogo monitoringa (Evaluation of troposphere edective latent heat fluxes over oceans by animated analysis of satellite radio-thermal remote data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 4, pp. 32–38.
3. Kutuza B. G., Danilichev M. V., Yakovlev O. I., *Sputnikovyi monitoring Zemli: Mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverkhnosti* (Satellite monitoring of the Earth: Microwave radiometry of the atmosphere and surface), Moscow: LENAND, 2016, 336 p.
4. Sharkov E. A., Shramkov Y. N., Pokrovskaya I. V., Povyshennoe sodержanie vodyanogo para v atmosfere tropicheskikh shirot kak neobkhodimoe uslovie genezisa tropicheskikh tsiklonov (The increased content of water vapor in the atmosphere of tropical latitudes as a necessary condition for the genesis of tropical cyclones), *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2012, No. 2, pp. 73–82.
5. Deeter M. N., A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean, *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, L02815.
6. Deeter M. N., Vivekanandan J., New dual-frequency microwave technique for retrieving liquid water path over land, *J. Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, D15209.
7. Draper D. W., Newell D., Wentz F. J., Krimchansky S., Skofronick-Jackson G. M., The Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI): Instrument overview and early on-orbit performance, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, Vol. 8, Issue 7, pp. 3452–3462.
8. Greenwald T. J., Combs C. L., Jones A. S., Randel D. L., Haar T. V., Further developments in estimating cloud liquid water over land using microwave and infrared satellite measurements, *J. Applied Meteorology*, 1997, Vol. 36, pp. 389–405.
9. Kawanishi T., Sezai T., Ito Y., The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies, *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, pp. 184–194.
10. Kämpfer N., *Monitoring Atmospheric Water Vapour: Ground-Based Remote Sensing and In-situ Methods*, ISSI Scientific Report Series 10. New York: Springer-Verlag, 2013, 328 p.
11. Trenberth K. E., Caron J. M., Estimates of Meridional Atmo-sphere and Ocean Heat Transports, *J. Climate*, 2001, Vol. 14, No. 16, pp. 3433–3443.