

Определение влагосодержания в безоблачной атмосфере над океаном по измерениям микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ

А. А. Косторная*, А. Н. Рублев, В. В. Голомолзин

Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”, Москва, Россия

*Контактный автор: Косторная Анжелика Андреевна, e-mail: kostornaya@rcpod.ru

Поступила 22 ноября 2019 г., доработана 5 марта 2020 г., принята в печать 25 марта 2020 г.

Представлена методика определения интегрального влагосодержания в безоблачной атмосфере над океанскими и морскими акваториями по измерениям микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ, устанавливаемого на российских гидрометеорологических спутниках серии “Метеор-М”. Определение влагосодержания осуществляется с помощью регрессий, предикторами которых являются измеренные интенсивности излучения в выбранных каналах радиометра. В их число могут входить каналы с рабочими спектральными диапазонами внутри и вне полос поглощения водяного пара. Адаптивный поиск оптимального набора каналов для различных районов земного шара проводится в зависимости от типа поверхности и климатической зоны. Критерием выбора каналов и вида регрессии является минимальная среднеквадратичная невязка получаемых оценок влагосодержания атмосферы с контрольными значениями, рассчитанными по данным реанализа Национального центра экологического прогнозирования (НСЕР) и специальных атмосферных моделей, разработанных в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF).

Ключевые слова: регрессионный анализ, микроволновое излучение, модель атмосферы, МТВЗА-ГЯ, интегральное влагосодержание.

Цитирование: Косторная А.А., Рублев А.Н., Голомолзин В.В. Определение влагосодержания в безоблачной атмосфере над океаном по измерениям микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ. Вычислительные технологии. 2020; 25(4):83–98. DOI:10.25743/ICT.2020.25.4.008.

Введение

Количество и вертикальное распределение водяного пара в столбе воздуха позволяют судить о положении атмосферных фронтов, движении воздушных масс. Кроме того, поглощение водяным паром излучения в инфракрасной (ИК) и микроволновой (МКВ) областях спектра оказывает значительное влияние на точность восстановления геофизических параметров атмосферы и подстилающей поверхности средствами дистанционного зондирования Земли [1]. Изучению пространственно-временного распределения водяного пара посвящено множество теоретических и экспериментальных работ [2–6]. Среди них важное место занимают публикации по спутниковым методам оценки его содержания [5, 6], поскольку позволяют производить глобальное восстановление параметров влажности и получать оперативную информацию об атмосфере на регулярной

основе. Погрешность определения влагосодержания спутниковыми методами составляет 10–30 % [7].

Методы оценки запаса неосажденной влаги в столбе безоблачной атмосферы — интегрального влагосодержания — средствами дистанционного зондирования Земли, как правило, используют измеренное поглощение водяного пара в различных диапазонах спектра, содержащих линии поглощения водяного пара. Поскольку МКВ-излучение чувствительно к типу и состоянию земного покрова, измерения в МКВ-диапазоне используются в основном для морской поверхности, так как для воды спектральная излучательная способность хорошо известна и существуют параметрические методики ее определения при различных скоростях ветра [6, 8].

СВЧ-радиометр МТВЗА-ГЯ (модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, названный в честь генерального конструктора космических систем, выдающегося ученого Г. Я. Гуськова) устанавливается на отечественных космических аппаратах серии “Метеор-М”. Радиометр принимает собственное излучение Земли и атмосферы в 29 каналах. Центры сканерных каналов, рабочих спектральных диапазонов 10.6, 18.7, 23.8, 31.5, 36.7, 42, 48, 91 ГГц которых лежат в окнах прозрачности атмосферы [1], предназначены для определения температуры и других характеристик подстилающей поверхности. Каналы, лежащие в полосах поглощения кислорода и водяного пара (52...57 и 183 ГГц) [9], предназначены для определения температурно-влажностной структуры атмосферы и водности облаков.

В связи с тем, что для МТВЗА-ГЯ отсутствуют проверенные (провалидированные) методики восстановления интегрального влагосодержания безоблачной атмосферы, в настоящей работе предложена регрессионная методика, использующая результаты измерений в каналах МТВЗА-ГЯ в качестве предикторов. Особенностью методики является адаптивный поиск оптимального набора предикторов в зависимости от типа поверхности и климатической зоны района измерений.

1. Методика определения интегрального влагосодержания

Излучение атмосферы (или подстилающей поверхности) на частоте ν , регистрируемое прибором на орбите, определяется выражением

$$I_\nu(\nu) = \varepsilon_\nu B_\nu(T_s) \tau_\nu(0, p_s) + \int_0^{p_s} B_\nu(T) W_\nu(p) \frac{dp}{p},$$

где I_ν — уходящее излучение системы Земля — атмосфера; ε_ν — излучательная способность поверхности; B_ν — функция Планка; T_s — температура поверхности земли; p_s — давление у поверхности земли; τ_ν — коэффициент прозрачности атмосферы; W_ν — весовая функция, которая характеризует вклад излучения различных уровней атмосферы и зависит от ее пропускающей способности [8–11].

Кроме водяного пара значительный вклад в величину поглощения и излучения вносит облачность. Для определения интегрального влагосодержания используются отдельно методики восстановления водозапаса облака и методики, восстанавливающие количество водяного пара в безоблачной атмосфере. При этом к методическим ошибкам определения влагосодержания добавляются ошибки определения маски облачности.

СВЧ-радиометр МТВЗА-ГЯ имеет пространственное разрешение от 10 до 100 км в зависимости от канала. Поскольку случай обширных безоблачных территорий — три-

виальный и динамические процессы в атмосфере в основном связаны с разорванной облачностью, будем рассматривать ситуации, когда пиксель частично заполнен облачностью. Суммарное излучение пикселя МТВЗА-ГЯ будет складываться из излучения безоблачных и облачных участков. При определении влагосодержания столба атмосферы проводится фильтрация облачности и учитывается излучение только безоблачных участков пикселя:

$$I_{pix}^* = (S' - S_{cloud})I_{clear} + S_{cloud}^*I_{clear}.$$

Здесь S' — площадь всего пикселя; S_{cloud} — площадь участков, закрытых облачностью; I_{clear} — излучение безоблачных участков; S_{cloud}^* — площадь кромок облаков. Сложность заключается в определении четкой границы облака (рис. 1). Ошибки в определении маски облачности будут вносить ошибку в величину суммарного излучения пикселя и, в свою очередь, в восстановленное значение влагосодержания.

Зная степень покрытия пикселя облаками (балл облачности, $B = S_{cloud}/S'$), можно отсеять площади, покрытые облачностью, однако это не отменит наличие ошибки вблизи кромки:

$$I_{pix} = S'(1 - B)I_{clear} + BS'S_{cloud}^*I_{cloud}.$$

Ошибку величины принятого излучения с безоблачных участков, связанную с использованием маски облачности, можно выразить следующим образом:

$$\delta I_{pix} \simeq -\frac{I_{pix}}{1 - B^2}dB.$$

Отсев облачных пикселей возможен на основе результатов сравнения $I_{pix} > h$ с заданным пороговым значением h , а усреднение ошибки δI_{pix} происходит за счет объема выборки: при его увеличении ошибка определения среднего значения влагосодержания уменьшается.

Восстановление влагосодержания производится на основе регрессионной зависимости. В отличие от, например, [7, 12, 13], в качестве предикторов предложено использовать не отдельные каналы, чувствительные к влагосодержанию, а набор каналов,

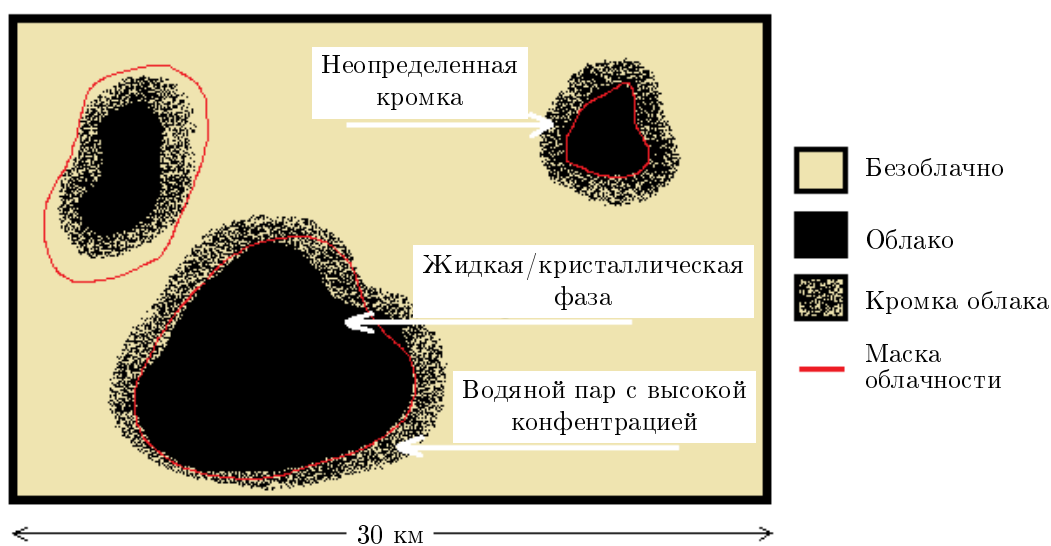


Рис. 1. Пример частично заполненного облачностью пикселя
 Fig. 1. Example of partially cloudy pixel

реагирующих на наличие облачности, аэрозолей, газовых составляющих. Предложено осуществить выбор k каналов из всех 29 каналов МТВЗА-ГЯ, которые можно использовать в качестве предикторов регрессии. Таким образом, определение влагосодержания атмосферы по данным измерений радиометра МТВЗА-ГЯ включает два этапа:

- предварительный — поиск типа зависимости и значимых предикторов;
- основной — восстановление значений влагосодержания в столбе безоблачной атмосферы.

Для поиска оптимального числа предикторов принималось во внимание, что для получения достоверных данных количество каналов и степень полинома не могут быть большими, так как это уменьшает число степеней свободы в уравнениях регрессии. Для проведения факторного анализа требуется набор данных, охватывающий возможный диапазон изменений исследуемой величины. Априорные значения влагосодержания должны обеспечивать необходимый интервал изменений параметра для условий реальной атмосферы.

Выбор вида уравнения регрессии для определения зависимости величины влагосодержания от измеренных значений яркостной температуры каналов x_{in} производился из полиномов первого и второго порядков [14]:

$$W_n = a_0 + \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^m (a_{i+k} x_{in}), \quad (1)$$

$$W_n = a_0 + \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^m (a_i x_{in} + a_{i+k} x_{in}^2). \quad (2)$$

Здесь W_n — влагосодержание в точке n , рассчитанное по априорным данным; a_i — коэффициенты регрессии; m — количество точек, k — набор каналов. Решение уравнений (1) и (2) проводилось методом наименьших квадратов [15]:

$$\mathbf{A} = (X^T X)^{-1} X^T W, \quad (3)$$

где X — матрица значений факторов, \mathbf{A} — вектор коэффициентов a_i . Ошибки оценивались по значению среднеквадратического отклонения (СКО) после расчета остаточной суммы квадратов по формуле

$$D = W^T W - A^T X^T W. \quad (4)$$

Априорные значения влагосодержания столба атмосферы ($\text{кг}/\text{м}^2$) рассчитывались с использованием следующих выражений [1, 10]:

$$\rho_l = \frac{\mu P_l}{R T_l}, \quad (5)$$

$$W_l = \rho_l \frac{s_l}{10^6} \frac{\mu_{вп}}{\mu}, \quad (6)$$

где l — уровень атмосферы, для которого производится расчет; ρ_l — парциальная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\mu = 0.02896$ $\text{кг}/\text{моль}$ — молекулярная масса сухого воздуха; $\mu_{вп} = 0.018$ $\text{кг}/\text{моль}$ — молекулярная масса водяного пара; $R = 8.31441$ $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ — универсальная газовая постоянная; P_l — давление, Па; T_l — температура, К; s_l — массовая доля водяного пара (ppm).

Влагосодержание столба атмосферы рассчитывалось путем численного интегрирования:

$$W_n = \sum_l \left[(h_l - h_{l+1}) \left(\frac{W_l - W_{l+1}}{2} \right) \right], \quad (7)$$

где h_l и h_{l+1} — верхняя и нижняя границы рассматриваемого слоя воздуха, м.

Выбор значимых предикторов, их количества и степени полинома для регрессионного соотношения осуществлялся двумя способами: с помощью подобранной комбинации каналов в соответствии с [6, 7, 12, 13, 16] путем адаптивного поиска, который был автоматизирован и включал следующие шаги.

1. Выбор k из n предикторов методом перебора. Количество предикторов последовательно варьировалось от 3 до 7. Количество возможных комбинаций в зависимости от априорных данных составило $2.5 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^5$. Рассматривались случаи, когда в качестве предикторов x_{in} использовались либо значения яркостных температур в каналах прибора, либо рассчитанные из них эффективные оптические толщины атмосферы для i -го канала:

$$\tau'_i = -\ln \frac{r_i}{r_i^*}. \quad (8)$$

Здесь r_i — интенсивность принятого на спутнике излучения в канале i ; r_i^* — рассчитанная по функции Планка интенсивность излучения, которую зарегистрировал бы датчик от абсолютно черного тела с температурой T , с поправкой на коэффициент излучения земной поверхности согласно классификации IGBP (Международная программа по гео- и биосфере) [17]:

$$r_j^* = \frac{\varepsilon c_1 v^3}{\exp\left(\frac{c_2 v}{T}\right) - 1}. \quad (9)$$

Здесь v — частота излучения, см^{-1} ; T — яркостная температура j -го канала, лежащего в окне прозрачности атмосферы; $c_1 = 0.1191 \cdot 10^{-7}$ и $c_2 = 1.43868$ — константы. Частота i -го канала измерения, которая используется в (8) для расчета τ'_i , должна находиться на границе полосы поглощения водяного пара, т. е. эффективная оптическая толщина τ'_i должна быть меньше единицы. В противном случае ее вычисление по закону Бугера — Ламберта в (8) из-за собственного излучения водяного пара сопровождается большими ошибками. В качестве предикторов дополнительно к τ'_i использовались температуры на уровне подстилающей поверхности, высотах 5, 10 км и др.

2. Расчет коэффициентов регрессии для каждого сочетания предикторов k (уравнения (1)–(4)).
3. Расчет среднеквадратического отклонения линии регрессии в пересчете на одну степень свободы по формуле

$$STD = \sqrt{\frac{D}{n - m}}, \quad (10)$$

где m — количество коэффициентов в выбранной регрессии (1) или (2).

4. Выбор набора предикторов, для которых среднеквадратическое отклонение (10) минимально.

Практическая реализация выбора вида регрессии, значимых предикторов и их количества показала, что для предикторов, используемых в [6, 7, 12, 13, 16], лучшие результаты (меньшие ошибки) получились для полинома первого порядка (1). При адаптивном поиске предикторов — для полинома второй степени (2).

2. Исходные данные для построения регрессии

В качестве исходных данных для построения регрессий на основе выражений (1)–(9) использовались вертикальные профили температуры и влажности, температуры и излучательной способности подстилающей поверхности по атмосферным моделям М. Matricardi [18, 19], а также значения влагосодержания атмосферы, вычисленные интегрированием модельных профилей концентрации H_2O . Регрессии (1) и (2) были получены для различных типов поверхности.

Профили атмосферы М. Matricardi созданы на основе базы данных ECMWF. Набор из 80 профилей охватывает почти весь наблюдаемый в природе диапазон изменения температуры атмосферы и концентраций газов CO_2 , N_2O , CO и CH_4 . В каждом профиле содержится информация о дате замера, широте и долготе, давлении у подстилающей поверхности (гПа), типе подстилающей поверхности (вода, снег, пустыня, лес и пр.), давлении (гПа), температуре (К) и концентрации H_2O , CO_2 , O_3 , N_2O , CO и CH_4 (ppmv) для 101 уровня атмосферы. Выборка профилей атмосферы равномерно распределена в пространстве, она включает точки для различных климатических зон (рис. 2) [18, 19]. Диапазон значений влагосодержания по профилям атмосферы М. Matricardi, рассчитанных по формулам (5) и (6), колеблется в интервале от 0 до 115 кг/м^2 .

Оценка качества регрессий проводилась на основе сопоставления со значениями влагосодержания атмосферы, полученными для этих же моделей, а также с данными NCEP/NCAR Reanalysis Project [20].

Проект реанализа NCEP/NCAR Reanalysis Project содержит постоянно обновляемые (с 1948 г. по настоящее время) архивы глобальных атмосферных полей, состоящих из данных наблюдений на суше и в океане, наблюдений с радиозондов, самолете-

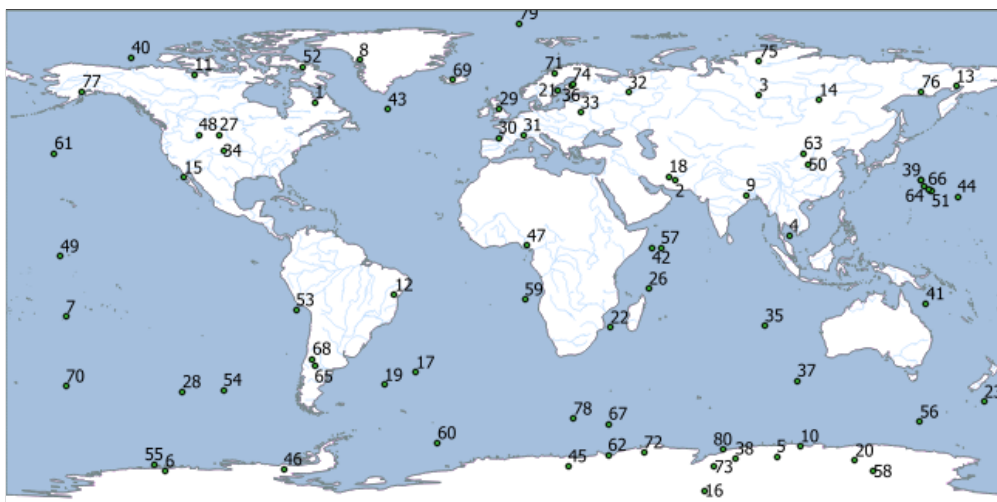


Рис. 2. Карта распределения набора атмосферных профилей М. Matricardi. Номер точки соответствует номеру профиля

Fig. 2. Map of atmospheric profiles М. Matricardi set. Point number corresponds to profile number

тов, спутников и других данных для целей исследования климата. Реанализ выполнен с использованием глобальной спектральной модели T62 [21]. Модель включает параметризацию всех главных физических процессов (крупно- и мелкомасштабной конвекции, крупномасштабных осадков, вертикальных и горизонтальных процессов диффузии, гравитационных волн), а также суточный цикл радиации с учетом облачности, физику пограничного слоя, гидрологию поверхностных вод суши. Данные NCEP предоставляются на регулярной сетке $0.25\text{--}0.5^\circ$. Для каждой точки сетки имеются значения параметров поверхности (температура, давление, соленость, скорость приводного ветра) и температурно-влажностный профиль на 31 уровне давления [20].

3. Условия моделирования и предварительная обработка исходных данных

Моделирование интенсивности излучения ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ср}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$) или яркостных температур (К) в каналах прибора МТВЗА-ГЯ проводилось с помощью быстрых радиационных моделей (БРМ) по методологии RTTOV (Radiative Transfer for TOVS) [18, 19]. Модели создавались на основе результатов расчетов точной полинейной модели (LBLRTM — The Line-By-Line Radiative Transfer Model) версии 12.2 [22] с помощью программного комплекса SatRas. Это совместная разработка НИЦ “Планета” и Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН [22, 23]. Полученные БРМ позволяют учитывать особенности вертикальных профилей температуры и водяного пара, наличие в атмосфере других газов, аэрозолей, параметры подстилающей поверхности и геометрию обзора прибора.

В моделях М. Matricardi [18, 19] непосредственно задается спектральная излучательная способность земной поверхности (вода, снег, пустыня, лес и пр.), для которой они получены. Так как излучательная способность различных поверхностей суши даже внутри определенного класса IGBP сильно меняется, для оценки потенциальной точности определения влагосодержания атмосферы по данным реанализа NCEP использовались морские модели. Излучение поверхности океана задавалось параметризацией

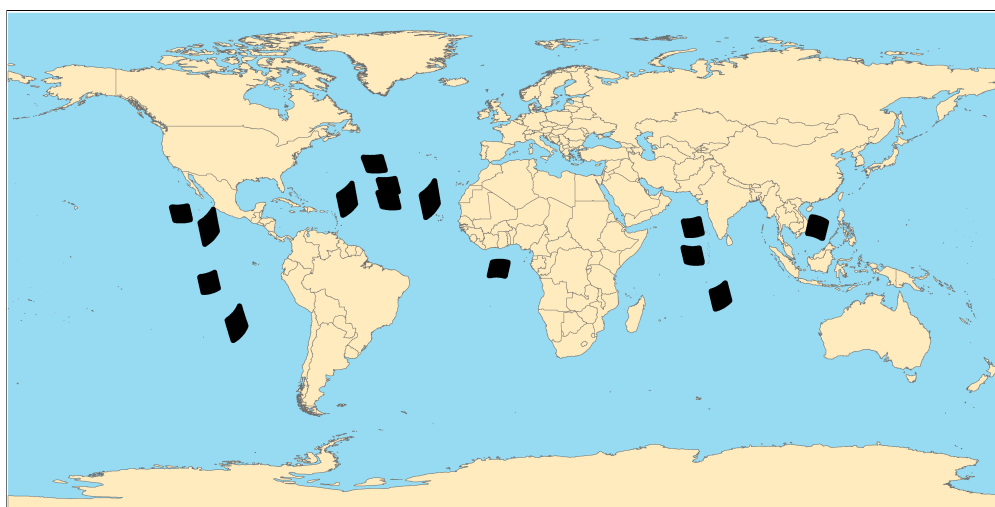


Рис. 3. Расположение участков выборки данных измерений МТВЗА-ГЯ за 2016–2017 гг.
Fig. 3. The locations of MTVZA-GY data for 2016–2017 years

FASTEM-5 [24] по зональной и меридиональной компонентам скорости приводного ветра (м/с), а также солености воды (‰).

Для выделения только морских безоблачных пикселей как основной использовался критерий, предложенный в [25]:

$$I = \frac{(36.7V - 36.7H)100}{36.7V - 36.7H}.$$

Здесь $36.7V$ и $36.7H$ — яркостная температура в каналах 36.7 ГГц вертикальной и горизонтальной поляризации. При $I > 20$ пиксель считается морским и свободным от облачности. Для уточнения наличия облачности дополнительно использовались каналы влажностного зондирования 183 ГГц, весовые функции которых имеют максимумы на высотах около 1.3 и 5 км [26].

Таким образом, выборку данных измерений МТВЗА-ГЯ за 2016–2017 гг. в безоблачных условиях составили 11 794 точки, расположенные над акваториями Тихого, Индийского и Атлантического океанов (рис. 3). Диапазон значений влагосодержания в выборке составил 20 до 70 кг/м². Поиск значимых предикторов и нахождение коэффициентов уравнения регрессии осуществлялись по учебному набору из 450 точек, наиболее полно охватывающих общий разброс значений влагосодержания.

4. Результаты

Сравнение значений влагосодержания, рассчитанных по профилям концентрации Н₂О моделей М. Matricardi, с восстановленными по модельным данным МТВЗА-ГЯ для регрессионных полиномов первой и второй степеней показано на рис. 4 и 5.

При подборе значимых предикторов на основе частот, используемых в [6, 7, 12, 13, 16], итоговое количество предикторов составило девять — 10.6, 18.7, 31.5, 36.7, 52.8, 53.8V, температура воздуха у подстилающей поверхности $t_{п.п}$ и на высотах 5.5 и 10 км — t_5 и t_{10} . Минимальное СКО отмечается для полинома первого порядка (см. уравнение (1)) — 5.45 кг/м², средняя относительная ошибка 55% (рис. 4). Несмотря на это, среднее значение модуля абсолютного отклонения для некоторых профилей достигает неприемлемых значений. Кроме того, использование в качестве предикторов помимо яркостных температур в шести каналах МТВЗА-ГЯ значений $t_{п.п}$, t_5 , t_{10} сопряжено с некоторыми трудностями. При обработке реальных измерений прибора необходимо использовать метеопараметры, соответствующие времени съемки, из баз наземной наблюдательной сети или данных численных прогнозов погоды. Этап поиска и загрузки дополнительной информации увеличивает время обработки спутниковых данных.

При адаптивном поиске предикторов минимальное СКО для полинома второй степени (см. уравнение (6)) составило 3.19 кг/м², что в 1.7 раза меньше, чем при ручном подборе. С целью уменьшения влияния ошибок, связанных с неопределенностью состояния атмосферы (вариации температуры, излучательной способности земной поверхности и т. п.), все модельные значения яркостных температур каналов МТВЗА-ГЯ были пересчитаны с помощью (8) в оптические толщины атмосферы. Яркостная температура, измеренная в первом канале МТВЗА-ГЯ (длина волны 0.36 см⁻¹ в окне прозрачности атмосферы), в (9) использовалась в качестве температуры подстилающей поверхности. Комбинация из пяти предикторов (оптические толщины атмосферы на длинах волн 18.7V, 36.7V, 52.8V, 91.65V, 183+7V) полинома второго порядка дает меньший разброс относительной ошибки, в отличие от аппроксимации полиномом первого порядка

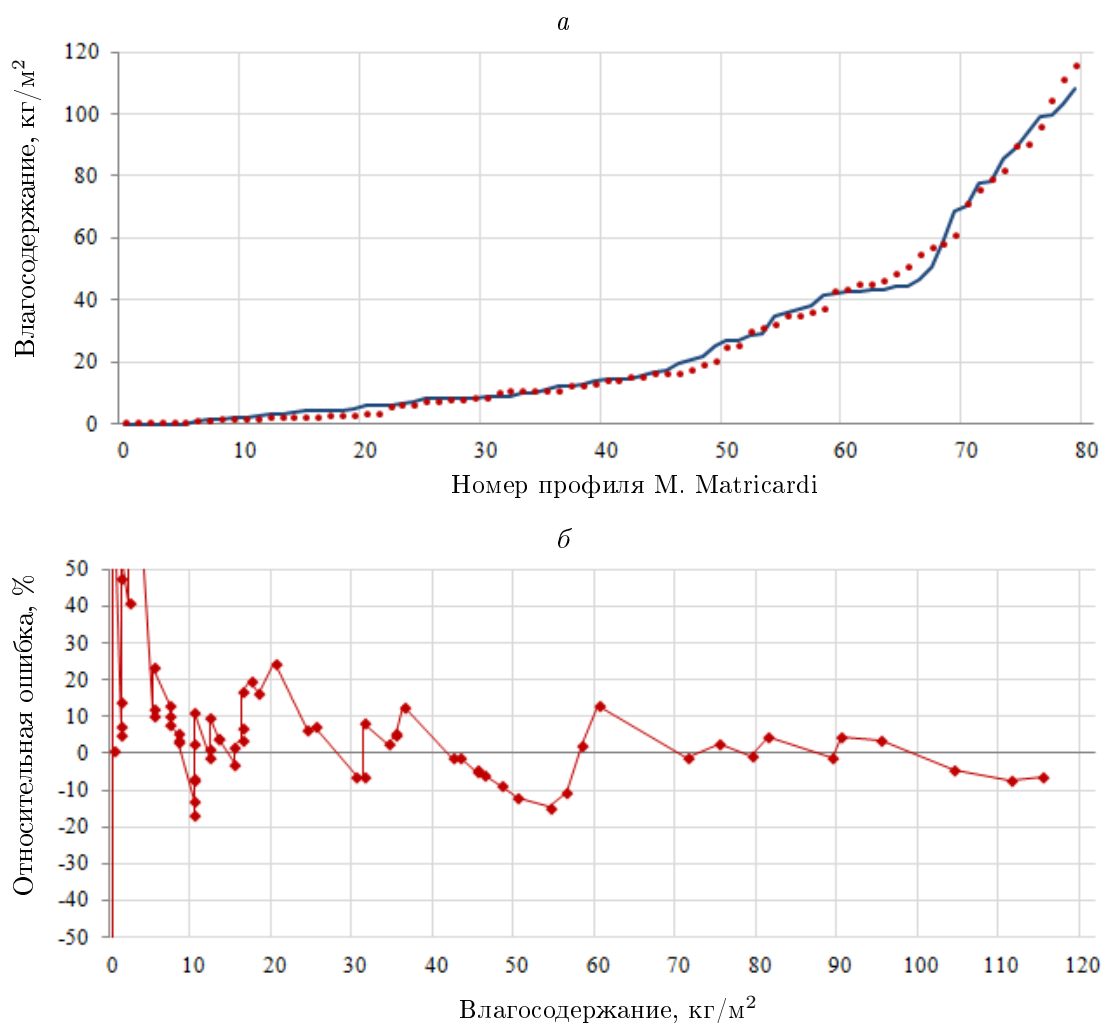


Рис. 4. Результаты расчетов с использованием полинома первого порядка и с помощью подобранной комбинации из девяти предикторов: *a* — ранжированные по возрастанию значения влагосодержания, рассчитанные по профилям М. Matricardi (значки) и уравнению регрессии (сплошная кривая); *б* — относительная ошибка
 Fig. 4. The results of data processing with the first-order polynomial and set of 9 predictors: *a* — total atmospheric water vapor content in increasing order, calculated by the regression and a priori data; *б* — relative error

и вручную подобранной комбинации из девяти предикторов (рис. 5). Для профилей высоких широт с влагосодержанием до 3 кг/м² относительная ошибка велика, но это объясняется малостью самой измеряемой величины.

Сравнение значений влагосодержания, рассчитанных по данным реанализа NCEP, с восстановленными по реальным измерениям прибора МТВЗА-ГЯ за период 2016–2017 гг. также показало меньшее СКО при адаптивном поиске предикторов. По учебной выборке найдена комбинация шести предикторов для уравнения регрессии второго порядка, включающая яркостные температуры каналов МТВЗА-ГЯ: 18.7Н, 23.8V, 23.8Н, 57+0.32+0.025Н, 57+0.32+0.01Н, 183+1.4V. Уравнение учитывает каналы поглощения не только водяного пара (23.8 и 183 ГГц), но и кислорода (57 ГГц), а также канал в окне прозрачности атмосферы 18.7Н. Среднеквадратическое отклонение для полино-

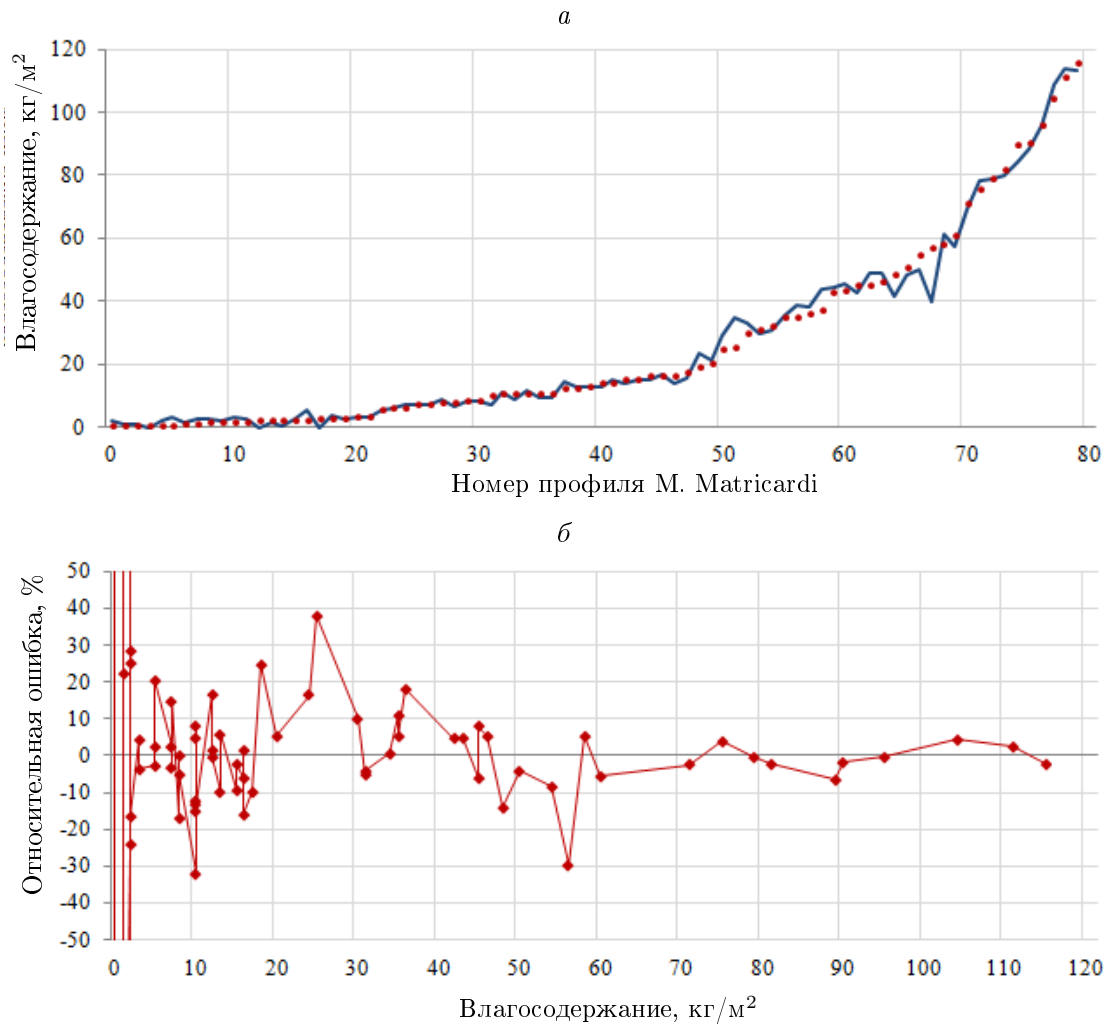


Рис. 5. Результаты расчетов с использованием полинома второго порядка и адаптивного поиска комбинации предикторов: *a* — ранжированные по возрастанию значения влагосодержания, рассчитанные по профилям М. Matricardi (значки) и уравнению регрессии (сплошная кривая); *б* — относительная ошибка

Fig. 5. The results of data processing with the second-order polynomial and adaptive searching the set of predictors: *a* — total atmospheric water vapor content in increasing order, calculated by the regression and a priori data; *б* — relative error

ма второй степени составило 4.4 кг/м^2 для учебной выборки из 450 точек (рис. 6) и 6.5 кг/м^2 для всей выборки из 11 794 точек (рис. 7).

Требования Всемирной метеорологической организации (ВМО) к определению общего содержания водяного пара допускают предельную погрешность в 5 кг/м^2 [27]. Для корректных расчетов по регрессионной зависимости необходимо регулярное проведение внешней калибровки каналов МТВЗА-ГЯ. Для используемых данных измерений МТВЗА-ГЯ за 2016–2017 гг. такие калибровки не проводились, поэтому значения СКО яркостных температур каналов от модельных составили 3.9 К для учебной выборки и 4.8 К для всей выборки. Отсутствие регулярной калибровки привело к увеличению ошибок восстановления влагосодержания до 6.5 кг/м^2 . При использовании методики в работе и проведении постоянных калибровок ошибка не превысит полученной для

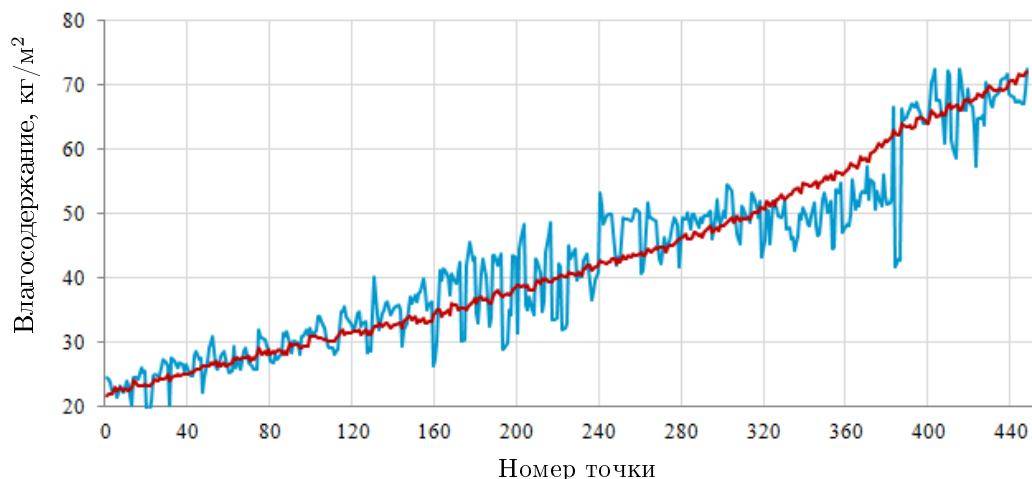


Рис. 6. Распределение ранжированных значений влагосодержания, рассчитанных по уравнению регрессии по данным реанализа NCEP для учебной выборки из 450 точек
 Fig. 6. Distribution of ranked integrated water vapor for a training sample of 450 points calculated by the equation of regression and NCEP/NCAR Reanalysis data

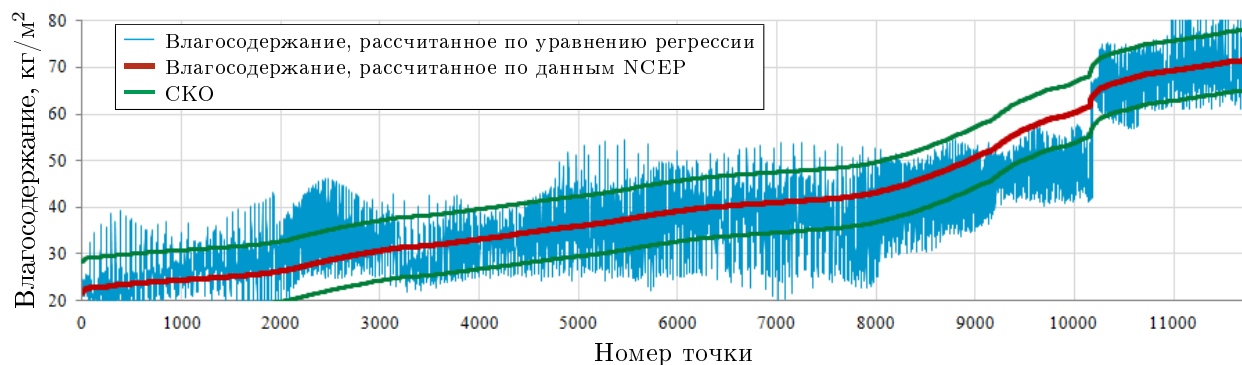


Рис. 7. Распределение значений влагосодержания, рассчитанных по уравнению регрессии, данным реанализа NCEP для всей выборки из 11 794 точек и СКО
 Fig. 7. Distribution of integrated water vapor for the entire sample of 11 794 points calculated by the equation of regression, NCEP/NCAR Reanalysis data and SKO

учебной выборки и, соответственно, будет меньше предельно допустимой по требованиям ВМО.

Заключение

Выбор каналов, которые можно использовать в качестве предикторов регрессии для определения влагосодержания, нетривиальная задача. Ручной подбор значимых предикторов с использованием принятых в большинстве методик каналов поглощения водяного пара показал худшие результаты по сравнению с поиском методом перебора всех возможных комбинаций предикторов. Анализ влияния различных каналов, в том числе с частотами, не относящимися к линиям поглощения водяного пара, и включение их в состав предикторов регрессии позволяют уменьшить величину ошибки.

Несмотря на то что результаты определения влагосодержания безоблачной атмосферы, представленные на рис. 7, и оценка СКО регрессии получены только для морских

пикселей, предложенная методика восстановления влагосодержания безоблачной атмосферы по измерениям в каналах прибора МТВЗА-ГЯ позволяет проводить адаптивный поиск оптимального набора каналов для различных районов земного шара и находить наилучшие комбинации для различных климатических зон и типов поверхности. Для этого требуется дополнительная регрессионная оценка излучательной способности подстилающей поверхности, которая получается на основе данных реанализа NCEP с помощью быстрых радиационных моделей.

Следует отметить, что ошибки определения влагосодержания, обусловленные ошибками фильтрации облачных пикселей, могут быть значительно уменьшены за счет дополнительной селекции с привлечением данных многозонального сканера МСУ-МР. Сканер входит в состав бортовой целевой аппаратуры космических аппаратов серии “Метеор-М” и обладает высоким (1 км) пространственным разрешением.

Список литературы

- [1] **Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М.** Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. М.: Гидрометеиздат; 1978: 280.
- [2] **Miloshevich L.M., Vomel H., Whiteman D.N., Leblanc T.** Accuracy assessment and correction of Vaisala RS92 radiosonde water vapour measurements. *Journal of Geophysical Research*. 2009; 114:11305–11327. DOI:10.1029/2008JD011565.
- [3] **Wang J., Zhang L., Dai A., Van Hove T., Van Baelen J.** A near-global, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS measurements. *Journal of Geophysical Research*. 2007; (112):D11107. DOI:10.1029/2006JD007529.
- [4] **Щукин Г.Г., Булкин В.В.** Метеорологическая пассивно-активная радиолокация. *Радиотехника и электроника*. 2011; 56(5):549–572.
- [5] **Zhang X.A., Pang J.** A comparison between atmospheric water vapour content retrieval methods using MSG2-SEVIRI thermal-IR data. *International Journal of Remote Sensing*. 2015; 36(19):1–12.
- [6] **Mitnik L.M., Mitnik M.L.** Retrieval of atmospheric and ocean surface parameters from ADEOS-II Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR) data: Comparison of errors of global and regional algorithms. *Radio Science*. 2003; 38(4):30-1–30-10.
- [7] **Образцов С.П., Щукин Г.Г.** Восстановление метеорологических характеристик атмосферы и температуры подстилающей поверхности по данным спутниковых измерений. *Методы и устройства передачи и обработки информации*. 2001; (1):92–96.
- [8] **Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.** Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука; 1974: 187.
- [9] **Болдырев В.В., Ильгасов П.А., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., Стрельников Н.И., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В.** Микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ КА “МЕТЕОР-М” № 1. *Вопросы электромеханики*. 2008; (107):22–25.
- [10] **Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.** Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука; 2003: 475.
- [11] **Калинин Н.А., Толмачева Н.И.** Космические методы исследований в метеорологии. Пермь.: Пермский гос. ун-т; 2005: 347.

- [12] **Караваяев Д.М., Шукин Г.Г.** Исследование вариаций характеристик микроволнового излучения и параметров влагосодержания атмосферы. Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Матер. VII Всерос. науч. конф. 2016: 73–76.
- [13] **Караваяев Д.М., Шукин Г.Г.** Метод микроволновой радиометрии атмосферы в задачах валидации спутниковой информации и радионавигационного обеспечения. Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн. Сб. тр. конф. “VII Всероссийские армандовские чтения”. 2017: 22–32.
- [14] **Пяткин Ф.В., Голомолзин В.В., Косторная А.А.** Применение регрессионного анализа для расчетов по данным приборов ИКФС-2 и МТВЗА спутника “МЕТЕОР-2”. Междунар. науч. конгр. “ИнтерЭкспо Гео-Сибирь 2019”. Сб. матер. в 9 т. 2019; (4):3–10.
- [15] **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. М.: Наука; 1969: 576.
- [16] **Deeter M.N.** A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean. Geophys. Res. Lett. 2007; 34(2):L02815. DOI:10.1029/2006GL028019.
- [17] Climate Data Guide. CERES: IGBP Land Classification. Available at: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/ceres-igbp-land-classification> (accessed 28.07.2019).
- [18] **Matricardi M.** The generation of RTTOV regression coefficients for IASI and AIRS using a new profile training set and a new line-by-line database. ECMWF Research Department Technical Memorandum. 2008; (564). Available at: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2008/11040-generation-rttov-regression-coefficients-iasi-and-airis-using-new-profile-training-set-and-new.pdf> (accessed 28.07.2019).
- [19] **Matricardi M.** RTIASI-4: a new version of the ECMWF fast radiative transfer model for the infrared atmospheric sounding interferometer. ECMWF Research Dept. Tech. Memo. 2003; (425). Available at: <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/11039-rtiasi-4-new-version-ecmwf-fast-radiative-transfer-model-infrared-atmospheric> (accessed 28.07.2019).
- [20] **Kistler R.** The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. Bulletin of the American Meteorological Society. 2001; (82):247–268.
- [21] **Han J., Roads J.O.** U.S. Climate sensitivity simulated with the NCEP regional spectral model. Climatic Change. 2004; 62(1-3):115–154.
- [22] **Успенский А.Б., Рублев А.Н., Русин Е.В., Пяткин В.П.** Быстрая радиационная модель для анализа данных гиперспектрального ИК-зондировщика спутников серии “Метеор-М”. Исследование Земли из космоса. 2013; (6):16–24.
- [23] **Пяткин В.П., Русин Е.В.** Развитие программного обеспечения быстрого моделирования измерений спутниковых инфракрасных зондировщиков. “Интерэкспо Гео-Сибирь-2014”. Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология. Сб. матер. 2014; (1):221.
- [24] **Liu Q., English S., Weng F.** Fast microwave ocean emissivity model version 5 (FASTEM-5). IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2012: 50.
- [25] **Zabolotskikh E., Timofeyev Y., Mitnik L., Uspenskii A.** Errors of microwave satellite measurements of sea surface wind speed, atmospheric water vapor, and cloud liquid water. Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics. 2002; 38(5):592–596.
- [26] **Gayfulin D., Tsyrunnikov M., Uspensky A.** Assessment and adaptive correction of observations in atmospheric sounding channels of the satellite microwave radiometer MTVZA GY. Pure and Applied Geophysics. 2018; (175):3653–3670.

- [27] **Andersson E.** Requirements for observational data: The rolling review of requirements. WMO. 2018. Available at: <https://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Documentation/RRR-process.pdf> (accessed 29.03.2019)

Вычислительные технологии, 2020, том 25, № 4, с. 83–98. © ФИЦ ИВТ, 2020
Computational Technologies, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 83–98. © FRC ICT, 2020

ISSN 1560-7534
eISSN 2313-691X

INFORMATION TECHNOLOGIES

DOI:10.25743/ICT.2020.25.4.008

The determination of the total atmospheric water vapor content over the oceans using the MTVZA-GY microwave radiometer measurements

KOSTORNAYA ANGELIKA A.*, RUBLEV ALEXEY N., GOLOMOLZIN VLADIMIR V.

State Research Center of Space Hydrometeorology “Planeta”, 123242, Moscow, Russia

*Corresponding author: Kostornaya Angelika A., e-mail: kostornaya@rcpod.ru

Received November 22, 2019, revised March 5, 2020, accepted March 25, 2020

Abstract

The determination of the total atmospheric water vapor content over the cloudless ocean using the MTVZA-GY measurements in microwave range is described. The microwave scanning radiometer MTVZA-GY is located on the Russian meteorological satellites “Meteor-M” and outgoing radiation of the surface-atmosphere system is measured in 29 channels. To calculate the integrated water vapor, the adaptive searching of the optimal set of channels using regression analysis was proposed. Frequencies that are not related to water-vapor absorption lines are used as predictors. The minimum of total approximation error was obtained for selected channels and corresponding regression coefficients values. The quality control of retrieval integrated water vapor (kg/m^2) was conducted with the help of the set of atmospheric profiles obtained by M. Matricardi and NCEP/NCAR Reanalysis as a priori data using the proposed method. Standard deviations (RMS) obtained by determined adaptive search for the predictors are about $3 \text{ kg}/\text{m}^2$. Application of the method for cloudless water areas allowed finding a set of 6 channels MTVZA GY (18.7H, 23.8V, 23.8H, $57+0.32+0.025\text{H}$, $57+0.32+0.01\text{H}$ и $183+1.4\text{V}$) for which the RMS values are minimal — $4.4 \text{ kg}/\text{m}^2$. The use of all channels of the device in the search allows reducing the error in determining the integrated water vapor content. The proposed method for recovering the content of water vapor from measurements in the channels of the MTVZA-GYa device allows an adaptive search for an optimal set of channels for different regions of the globe and find the best combinations for various climatic zones and surface types.

Keywords: regression analysis, microwave radiation, atmospheric model, MTVZA-GY, integrated water vapor, total atmospheric water vapor content.

Citation: Kostornaya A.A., Rublev A.N., Golomolzin V.V. The determination of the total atmospheric water vapor content over the oceans using the MTVZA-GY microwave radiometer measurements. Computational Technologies. 2020; 25(4):83–98. DOI:10.25743/ICT.2020.25.4.008. (In Russ.)

References

1. Kondrat’ev K.Ya., Timofeev Yu.M. Meteorologicheskoe zondirovanie atmosfery iz kosmosa [Meteorological sounding of the atmosphere from space]. Moscow: Gidrometeoizdat; 1978: 280. (In Russ.)

2. Miloshevich L.M., Vomel H., Whiteman D.N., Leblanc T. Accuracy assessment and correction of Vaisala RS92 radiosonde water vapour measurements. *Journal of Geophysical Research*. 2009; 114: 11305–11327. DOI:10.1029/2008JD011565.
3. Wang J., Zhang L., Dai A., Van Hove T.V., Van Baelen J. A near-global, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS measurements. *Journal of Geophysical Research*. 2007; (112):D11107. DOI:10.1029/2006JD007529.
4. Shchukin G.G., Bulkin V.V. Meteorological passive-active radar observations. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2011; 56(5):509.
5. Zhang X.A., Pang J. A comparison between atmospheric water vapour content retrieval methods using MSG2-SEVIRI thermal-IR data. *International Journal of Remote Sensing*. 2015; 36(19):5075–5086.
6. Mitnik L.M., Mitnik M.L. Retrieval of atmospheric and ocean surface parameters from ADEOS-II Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR) data: Comparison of errors of global and regional algorithms. *Radio science*. 2003; 38(4):30-1–30-10.
7. Obraztsov S.P., Shchukin G.G. Recovery of meteorological atmospheric characteristics and surface temperature from satellite measurements. *Methods and Devices of Information Transmission and Processing*. 2001; (1):92–96. (In Russ.)
8. Basharinov A.E., Gurvich A.S., Egorov S.T. Radioizluchenie Zemli kak planety [The radio emission of the Earth as a planet]. Moscow: Nauka; 1974: 187. (In Russ.)
9. Boldyrev V.V., Il'gasov P.A., Pancov V.Yu., Prohorov Yu.N., Strel'nikov N.I., Chernyy I.V., Chernyavskiy G.M., Yakovlev V.V. Microwave scanner / sounder MTVZA-GY on "METEOR-M" No. 1. *Electromechanical Matters. VNIEM Studies*. 2008; (107):22–25. (In Russ.)
10. Timofeev Yu.M., Vasil'ev A.V. Teoreticheskie osnovy atmosfery optiki [Theoretical fundamentals of atmospheric optics]. S.-Peterburg: Nauka; 2003: 475. (In Russ.)
11. Kalinin N.A., Tolmacheva N.I. Kosmicheskie metody issledovaniy v meteorologii [Space research methods in meteorology]. Perm': Permskiy gosudarstvennyy universitet. 2005; 347. (In Russ.)
12. Karavaev D.M., Shchukin G.G. Issledovanie variatsiy harakteristik mikrovolnovogo izlucheniya i parametrov vlagosoderzhaniya atmosfery [Examination of microwave radiation characteristics variations and parameters of atmospheric moisture]. *Radiofizicheskie Metody v Distantsionnom Zondirovanii Sred. Materialy VII Vserossiyskoy Nauchnoy Konferentsii (Radiophysical Methods in Remote Sensing. Materials of the VII All-Russian Scientific Conference)*. Murom: Muromskiy Institut (Filial) Gosudarstvennogo Obrazovatel'nogo Uchrezhdeniya Vysshego Professional'nogo Obrazovaniya "Vladimirskiy Gosudarstvennyy Universitet im. Aleksandra Grigor'evicha i Nikolaya Grigor'evicha Stoletovykh". 2016: 73–76. (In Russ.)
13. Karavaev D.M., Shchukin G.G. Metod mikrovolnovoy radiometrii atmosfery v zadachah validatsii sputnikovoy informatsii i radionavigatsionnogo obespecheniya [The method of microwave radiometry of the atmosphere in the problems of validating the satellite information and radio navigation support]. *Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya, Rasprostraneniya i Difraktsii Radiovoln. Sbornik Trudov Konferentsii "VII Vserossiyskie Armandovskie Chteniya" (Remote Sensing Problems of Distribution and Diffraction of Radio Waves. Proceedings of the Conference "VII All-Russian Armandov readings")*. Murom: Muromskiy Institut (Filial) Gosudarstvennogo Obrazovatel'nogo Uchrezhdeniya Vysshego Professional'nogo Obrazovaniya "Vladimirskiy Gosudarstvennyy Universitet im. Aleksandra Grigor'evicha i Nikolaya Grigor'evicha Stoletovykh". 2017: 22–32. (In Russ.)
14. Pyatkin F.V., Golomolzin V.V., Kostornaya A.A. Application of regression analysis for calculations based on the data of the IKFS-2 and MTVZA devices of the METEOR-2 satellite. *The International Exhibition and Scientific Congress "Interexpo GEO-Siberia". The Collection of Materials. [Mezhdunarodnyy Nauchnyy Kongress "InterEkspo Geo-Sibir'-2019". Sbornik Materialov v 9 t.]*. Novosibirsk: SGUGiT; 2019: (4):3–10. (In Russ.)
15. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnostey [Probability theory]. Moscow: Izdatel'stvo Nauka; 1969: 576. (In Russ.)
16. Deeter M.N. A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean. *Geophys. Res. Lett.* 2007; 34(2):L02815. DOI:10.1029/2006GL028019.
17. Climate data guide. CERES: IGBP land classification. Available at: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/ceres-igbp-land-classification> (accessed 29.03.2019).
18. Matricardi M. The generation of RTTOV regression coefficients for IASI and AIRS using a new profile training set and a new line-by-line database. *ECMWF Research Department Technical Memorandum*. 2008; (564). Available at: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2008/>

- 11040-generation-rttov-regression-coefficients-iasi-and-air-s-using-new-profile-training-set-and-new.pdf (accessed 28.07.2019).
19. Matricardi M. RTIASI-4: A new version of the ECMWF fast radiative transfer model for the infrared atmospheric sounding interferometer. ECMWF Research Dept. Tech. Memo. 2003; (425). Available at: <https://www.ecmwf.int/en/e-library/11039-rtiasi-4-new-version-ecmwf-fast-radiative-transfer-model-infrared-atmospheric> (accessed 28.07.2019).
 20. Kistler R. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation. Bulletin of the American Meteorological Society. 2001; (82):247–268.
 21. Han J., Roads J.O. U.S. climate sensitivity simulated with the NCEP regional spectral model. Climatic Change. 2004; 62(1–3):115–154.
 22. Uspenskiy A.B., Rublev A.N., Rusin E.V., Pyatkin V.P. A fast radiative transfer model for the METEOR-M satellite-based hyperspectral IR sounders. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2014; 50(9):968–977.
 23. Pyatkin V.P., Rusin E.V. Development of the software for fast simulation of measurements for satellite-based infrared sounders. The International Exhibition and Scientific Congress “Interexpo GEO-Siberia”. The collection of materials. Novosibirsk: Siberian State University of Geosystems and Technologies; 2014; (1):1–6. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitiie-programmnogo-obespecheniya-bystrogo-modelirovaniya-izmereniy-sputnikovyh-infrakrasnyh-zondiroyshchikov/viewer>
 24. Liu Q., English S., Weng F. Fast microwave ocean emissivity model version 5 (FASTEM-5). IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2012; 50.
 25. Zabolotskikh E., Timofeyev Y., Mitnik L., Uspenskii A. Errors of microwave satellite measurements of sea surface wind speed, atmospheric water vapor, and cloud liquid water. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2002; 38(5):670–675.
 26. Gayfulin D., Tsyrlunikov M., Uspenskiy A. Assessment and adaptive correction of observations in atmospheric sounding channels of the satellite microwave radiometer MTVZA GY. Pure and Applied Geophysics. 2018; (175):3653–3670.
 27. Andersson E. Requirements for observational data: The rolling review of requirements. Available at: <https://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Documentation/RRR-process.pdf> (accessed 28.07.2019).