

Коррекция оценок водозапаса облачности по данным спутникового мониторинга

В. П. Саворский

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, 141190, Московская обл., Россия
E-mail: savor@inbox.ru*

Одна из наиболее значимых систематических ошибок при определении параметров облачного слоя связана с неоднородностью облачного слоя в поле зрения СВЧ-сенсоров. Получаемые при этом невязки в оценках оптического пути излучения в облаках, так называемые CLWP, требуют коррекции, поскольку эти невязки могут достигать двух раз, например на участках атмосферы с неглубокой кучевой конвекцией. Это определяет значимость и актуальность коррекции значений CLWP, поскольку эти значения задают величины водозапаса облаков и, как следствие, вероятностные оценки прогнозируемых объёмов и интенсивности дождевых осадков из них. В работе предложена и реализована методика коррекции оценок водозапаса облачности по данным СВЧ-мониторинга с использованием данных о масках облачности, полученным по результатам синхронных наблюдений облачного слоя с геостационарных платформ в видимом и ИК-диапазонах. Разработан общий методический подход, а также показаны возможности современных средств наблюдения, обеспечивающие высокое временное разрешение, способствующее своевременному обнаружению и мониторингу быстроразвивающихся опасных атмосферных явлений типа мезомасштабных конвективных комплексов. Получены асимптотические решения для малых значений CLWP в нижних слоях атмосферы (под облаками) и для предельных, в земных условиях, значений отражения СВЧ-излучения от поверхности земли.

Ключевые слова: СВЧ-радиометр, яркостная температура, водозапас облаков, относительная площадь облаков

Одобрена к печати: 14.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-78-86

Введение

Оценки параметров состояния облачного слоя Земли входят в состав наиболее актуальных задач исследования Земли из космоса (Stephens et al., 2019). Однако, как отмечено в работе (Stephens et al., 2019), «несмотря на то, что мы добились значительного прогресса в прогнозировании погоды в субсезонных и сезонных временных масштабах (см., например, (Bauer et al., 2015)), теперь мы осознаём необходимость лучшего представления всех влажностных процессов в атмосфере, в особенности того, что в конечном итоге связано с облаками, как основной задачи не только для улучшения прогнозов погоды в сезонных масштабах, но и для понимания долгосрочных изменений климата (Bony et al., 2015)».

Совместные оценки водозапаса облаков, или вертикально интегрированного содержания жидкой воды в облаках, а также CLWP (*англ.* Cloud Liquid Water Path — оптический путь излучения в слое облаков), интегрального влагосодержания и интенсивности жидких атмосферных осадков по данным спутникового сверхвысокочастотного (СВЧ) радиометрического излучения в настоящее время входят в состав единой зрелой технологии (Stephens, Kummerow, 2007). К настоящему времени сформированы ряды более чем 29-летних наблюдений CLWP по данным наблюдений, проведённых группой из 15 низкоорбитальных спутников. Эти ряды объединены в единые климатологические базы данных по CLWP. Например, такой базой является MAC-LWP (*англ.* The Multisensor Advanced Climatology of Liquid Water Path — База по мультисенсорной усовершенствованной климатологии оптического пути в жидкокапельных облаках) (Elsaesser et al., 2017).

Как указано в работе (Elsaesser et al., 2017), одна из наиболее значимых систематических ошибок в оценках CLWP связана с неоднородностью облачного слоя в поле зрения СВЧ-сенсоров (Bremen et al., 2002), т.е. с наличием разрывов, в которых отсутствуют слои жидкокапельной влаги. Получаемые при этом невязки в оценках CLWP, особенно связанные со структурой дождя и облаков, трудно количественно оценить и исправить из-за отсутствия верифицированных наборов независимо измеренных данных для CLWP. При этом, как показано в исследовании (Lebsock, Su, 2014), неучёт разрывов приводит к двукратным расхождениям в оценках CLWP в регионах с неглубокой кучевой конвекцией. Это указывает на значимость и актуальность проблемы коррекции оценок CLWP по данным спутниковых наблюдений, поскольку эти значения определяют величины водозапаса облачного слоя и, как следствие, вероятностные оценки прогнозируемых объёмов и интенсивности дождевых осадков.

Одним из путей решения проблемы представляется коррекция оценок CLWP, полученных в предположении отсутствия разрывов (безоблачных участков) в облачном слое, попадающем в поле зрения радиометра, с учётом реального заполнения поля зрения радиометра облаками. Разработка подобного рода коррекции и становится основной целью работы.

Существующие подходы

На необходимость учёта степени заполнения поля зрения СВЧ-радиометра облаками, по видимому, впервые указано в работе (Christopher, Chou, 1997), в которой было показано, что некорректный учёт степени заполнения поля зрения радиометра облаками приводит к смещённым оценкам (занижению) значений оценок полного поглощения в сплошном облачном слое. Этот эффект был определён как проблема заполнения поля зрения радиометра (*англ.* beam-filling problem). Следует отметить, что, обозначив проблему, авторы работы (Christopher, Chou, 1997) не предложили приемлемого метода коррекции CLWP. Этот метод был впервые приведён и обоснован в исследовании (Wentz, Spencer, 1998). При этом авторы работы (Wentz, Spencer, 1998) исходили из простых модельных предположений о переносе радиотеплового излучения в атмосфере:

$$T_B = T_E(\tau)(1 - \tau^2\rho), \quad (1)$$

$$\tau = e^{-A_{cl}/\cos\theta}, \quad (2)$$

где $T_E(\tau)$ — радиояркостная температура системы «атмосфера – подстилающая поверхность»; τ — пропускная способность (коэффициент пропускания) атмосферы; ρ — коэффициент отражения от поверхности; A_{cl} — оптический путь в атмосфере; θ — угол визирования земной поверхности. Как отмечают авторы работы (Wentz, Spencer, 1998), выражение (1) достаточно точно аппроксимирует T_B . Исходя из статистических предположений, в частности о степенном распределении показателей поглощения в облаках, в исследовании (Wentz, Spencer, 1998) была получена формула пересчёта усреднённого по неоднородному облачному полю значения оптического пути \bar{A}_{cl} (усреднённое по полю зрения СВЧ-радиометрической системы CLWP) в значения A_{cl} для участков сплошной облачности (CLWP в однородном, без разрывов, облачном), который задаёт значение поглощения в облаке τ_{cl} соотношением, аналогичным (2):

$$\tau_{cl} = e^{-A_{cl}/\cos\theta}. \quad (3)$$

В результате анализа (Wentz, Spencer, 1998) была также показана необходимость учёта нелинейной связи между указанными значениями оценок. Методический подход (Wentz, Spencer, 1998) был развит в дальнейшем в работах (Hilburn, Wentz, 2008; O'Dell et al., 2008). При этом, как и в исследовании (Wentz, Spencer, 1998), единственным источником данных для оценок поглощения в облаках выступают данные многоканальных поляризационных СВЧ-радиометрических измерений. Как показано в работе (Wentz, Meissner, 2000), оптический путь A_{cl} непосредственно связан с водозапасом облака W следующим отношением:

$$A_{cl} = \frac{0,6\pi W}{\lambda} \cdot \text{Im} \frac{1-\varepsilon}{2+\varepsilon}. \quad (4)$$

Соотношения (3) и (4) позволяют по оценкам τ_{cl} , определяемым данными спутниковых измерений, находить значения водозапаса сплошного облачного покрова. Но для разрывного облачного покрова значения $\bar{\tau}_{cl}$ должны быть скорректированы, т. е. пересчитаны в значения τ_{cl} в соответствии со значениями параметров разрывного облачного покрова, и прежде всего со значениями его сомкнутости, т. е. значениями относительной площади облаков ξ .

Коррекция значений коэффициентов пропускания радиотеплового излучения в разрывном облачном слое

Наблюдаемая со спутниковой платформы радиояркая температура системы «атмосфера – подстилающая поверхность» при наличии сплошного облачного слоя может быть представлена в следующем виде:

$$T_b = (1-R)T_S\tau_1\tau_2\tau_3 + T_1(1-\tau_1)\tau_2\tau_3 + T_2(1-\tau_2)\tau_3 + T_3(1-\tau_3) + T_3(1-\tau_3)\tau_1\tau_2R\tau_1\tau_2\tau_3 + T_2(1-\tau_2)\tau_1R\tau_1\tau_2\tau_3 + T_1(1-\tau_1)R\tau_1\tau_2\tau_3. \quad (5)$$

Здесь τ_1, τ_2, τ_3 — коэффициенты пропускания слоёв атмосферы под облаками, в облаках и над ними соответственно, а T_1, T_2, T_3 — эффективная термодинамическая температура этих слоёв; R — коэффициент отражения земной поверхности, а T_S — её температура. Выражение (5) существенно упрощается, поскольку при $\tau_2 \ll 1$, что типично, в частности, для наблюдения конвективной облачности в сантиметровом СВЧ-диапазоне от 10 до 19 ГГц, верно следующее приближение:

$$T_3(1-\tau_3)\tau_1\tau_2R\tau_1\tau_2\tau_3 + T_2(1-\tau_2)\tau_1R\tau_1\tau_2\tau_3 = R\tau_1^2\tau_2\tau_3 [T_3(1-\tau_3)\tau_2 + T_2(1-\tau_2)] \approx RT_2\tau_1^2\tau_2\tau_3(1-\tau_2),$$

поскольку $T_3(1-\tau_3)\tau_2 \ll T_2(1-\tau_2)$ при $\tau_2 \ll 1$, $T_3 < T_2$ и $\tau_3 > \tau_2$, т. е. в условиях развитой облачности с высоким поглощением и, соответственно, малой пропускной способностью. В этом случае выражение (5) можно представить в следующем виде:

$$T_b = (1-R)T_S\tau_1\tau_2\tau_3 + T_1(1-\tau_1)\tau_2\tau_3 + T_1(1-\tau_1)R\tau_1\tau_2\tau_3 + T_2(1-\tau_2)\tau_3 + T_2(1-\tau_2)\tau_1R\tau_1\tau_2\tau_3 + T_3(1-\tau_3). \quad (6)$$

Дальнейшее существенное упрощение можно получить при следующих асимптотических предположениях:

- 1) $\tau_1 = 0$ (сильное поглощение в атмосфере под облаками), при котором

$$T_b = T_1\tau_2\tau_3 + T_2(1-\tau_2)\tau_3 + T_3(1-\tau_3); \quad (7)$$

- 2) $\tau_1 = 1$ (поглощение в атмосфере под облаками мало по сравнению с поглощением в облаках) и $R = 0$ (малое отражение, типичное для поверхности суши), при которых

$$T_b = T_S\tau_2\tau_3 + T_2(1-\tau_2)\tau_3 + T_3(1-\tau_3). \quad (8)$$

В этом случае выражения (7) и (8) можно представить в обобщённом виде:

$$T_b = T_{1b}\tau_2\tau_3 + T_2(1-\tau_2)\tau_3 + T_{3b}, \quad (9)$$

где

$$T_{1b} = \begin{cases} T & \text{при } \tau_1 = 0, \\ T_S & \text{при } \tau_1 = 1 \text{ и } R = 0, \end{cases} \quad (10)$$

$$T_{3b} = T_3(1-\tau_3). \quad (11)$$

Связь между средним по разрывному облачному слою коэффициентом пропускания СВЧ-излучения и коэффициентом пропускания сплошного облачного слоя можно установить,

используя соотношение (9) с учётом относительной площади облаков в поле зрения СВЧ-радиометра. Наблюдаемая радиометром радиояркая температура задаётся формулой:

$$\bar{T}_b = T_{1b} \bar{\tau}_2 \tau_3 + T_2 (1 - \bar{\tau}_2) \tau_3 + T_{3b}, \quad (12)$$

где $\bar{\tau}_2$ — усреднённая по полю зрения СВЧ-радиометра пропускная способность разрывного облачного поля. При этом радиояркая температура самих облаков равна:

$$T'_b = T_{1b} \tau_2 \tau_3 + T_2 (1 - \tau_2) \tau_3 + T_{3b} = (T_{1b} - T_2) \tau_2 \tau_3 + T_2 \tau_3 + T_{3b}, \quad (13)$$

а разрывов между ними:

$$T''_b = T_2 \tau_3 + T_{3b}. \quad (14)$$

Выражение (14) упрощено в предположении, что коэффициенты пропускания разрывов облачного слоя существенно больше коэффициентов пропускания излучения в облаках τ_2 , т.е. $\tau_{2clear} \gg \tau_2$, и кроме того $\tau_{2clear} \cong 1$.

С другой стороны, \bar{T}_b можно представить в виде суперпозиции T'_b и T''_b :

$$\bar{T}_b = \xi T'_b + (1 - \xi) T''_b, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} T_{1b} \bar{\tau}_2 \tau_3 + T_2 (1 - \bar{\tau}_2) \tau_3 + T_{3b} &= \xi T'_b + (1 - \xi) T''_b = \\ &= \xi [T_{1b} \tau_2 \tau_3 + T_2 (1 - \tau_2) \tau_3 + T_{3b}] + (1 - \xi) [T_2 \tau_3 + T_{3b}]. \end{aligned} \quad (16)$$

В результате перегруппировки слагаемых уравнения (13) и выделения общего сомножителя $(T_{1b} - T_2)$ приводим выражение (13) к следующему соотношению между τ_2 и $\bar{\tau}_2$:

$$\bar{\tau}_2 - 1 + \xi = \xi \tau_2. \quad (17)$$

И соответственно, к зависимости τ_2 от $\bar{\tau}_2$:

$$\tau_2 = \frac{\bar{\tau}_2 - 1 + \xi}{\xi}. \quad (18)$$

Поскольку $0 < \bar{\tau}_2 < 1$, $0 < \tau_2 < 1$, $0 < \xi < 1$, диапазоны изменчивости τ_2 и ξ при известном $\bar{\tau}_2$ определяются следующими неравенствами:

$$0 < \tau_2 < \bar{\tau}_2, \quad (19)$$

$$1 - \bar{\tau}_2 < \xi < 1. \quad (20)$$

При $\xi \rightarrow 1$ получается: $\tau_2 \rightarrow \bar{\tau}_2$. Область допустимых значений: $\xi > \bar{\tau}_2$.

Представленная на рис. 1 связь соотношения (18) между средним по разрывному облачному слою коэффициентом пропускания СВЧ-излучения и коэффициентом пропускания сплошного облачного слоя показывает, насколько существенен учёт относительной площади облаков в поле зрения СВЧ-радиометра ξ .

3. $\tau_1 = 1$ (поглощение в атмосфере под облаками мало по сравнению с поглощением в облаках) и $R = 0,5$ (коэффициент отражения, характерный для водной поверхности), при которых выражение (5) упрощается до следующего представления:

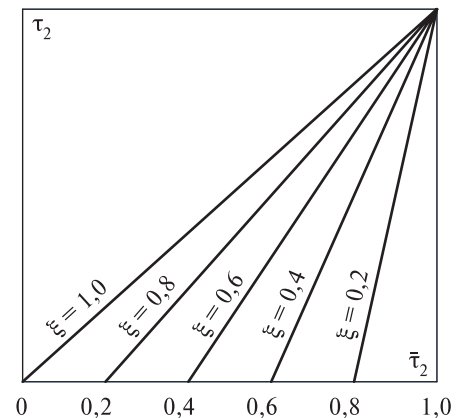
$$T_b = 0,5 T_S \tau_2 \tau_3 + T_2 (1 - \tau_2) (1 + 0,5 \tau_2) \tau_3 + T_3 (1 - \tau_3), \quad (21)$$

отсюда:

$$T_b = -0,5 T_2 \tau_2^2 \tau_3 + 0,5 (T_S - T_2) \tau_2 \tau_3 + T_3 (1 - \tau_3) + T_2 \tau_3. \quad (22)$$

Описывая суперпозицию облачных и безоблачных участков, аналогично (13)–(15) получаем следующее равенство:

Рис. 1. Зависимость коэффициента пропускания сплошного облачного слоя τ_2 от средневзвешенного значения $\bar{\tau}_2$



$$\begin{aligned}
 & -0,5\xi T_2 \tau_2^2 \tau_3 + 0,5\xi(T_S - T_2)\tau_2 \tau_3 + T_3 \xi(1 - \tau_3) + \xi T_2 \tau_3 + T_3(1 - \xi)(1 - \tau_3) + (1 - \xi)T_2 \tau_3 = \\
 & = -0,5T_2 \bar{\tau}_2^2 \tau_3 + 0,5(T_S - T_2)\bar{\tau}_2 \tau_3 + T_3(1 - \tau_3) + T_2 \tau_3.
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

$$\xi T_2 \tau_2^2 - \xi(T_S - T_2)\tau_2 - T_2 \bar{\tau}_2^2 + (T_S - T_2)\bar{\tau}_2 = 0.
 \tag{24}$$

Уравнение (24) при $\bar{\tau}_2 \rightarrow 1$ всегда имеет единственное решение, поскольку в земных условиях выполняется условие $2T_2 > T_S$. Зависимости τ_2 от $\bar{\tau}_2$ общем случае требуют численного моделирования по данным спутниковых СВЧ-данных и наземных *in situ* измерений параметров атмосферы.

Применение данных геостационарного мониторинга

В настоящей работе наряду с спутниковыми СВЧ-радиометрическими данными для коррекции оценок водозапаса предлагается привлекать данные видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов. Прежде всего, это необходимо для того, чтобы, как показано ниже, корректировать данные о водозапасе облаков, получаемые при наблюдении разрывной облачности. Наиболее подходящими для этих целей представляются данные наблюдений, получаемые в результате мониторинга Земли с геостационарных платформ.

Обусловлено это высоким временным разрешением (повторяемостью наблюдений) при достаточно высоком по сравнению с СВЧ-радиометрическими датчиками пространственном разрешении. Так, для научной аппаратуры SEVIRY (*англ.* Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager), устанавливаемой на геостационарных космических аппаратах серии MSG (*англ.* Meteosat Second Generation), период повторения, т. е. передачи кадров с изображением Земли, составляет 10 мин (Werner, Deneke, 2020).

Параметр ξ для применения при обработке данных спутникового СВЧ-радиометрического зондирования можно оценить, используя результаты наблюдений с геостационарных платформ. В частности, можно получить данные о маске облачности и оценить по этим данным значения ξ для каждого пикселя по полю зрения спутникового СВЧ-радиометра, учитывая, что пространственное разрешение приборов видимого и ИК-диапазонов в 5–6 раз лучше, чем пространственное разрешение спутниковых СВЧ-радиометров. Современные системы наблюдения Земли с геостационарных платформ (см., например, работу (Werner, Deneke, 2020)) обеспечивают снимок земного полушария с периодичностью порядка 15 мин, что более чем достаточно для синхронизации наблюдений с этих платформ с проведением измерений одного и того же участка земной поверхности с полярноорбитальных платформ с применением СВЧ-радиометрической аппаратуры. Получаемые при этом оценки наличия облачного покрова формируются в виде маски облаков, предоставляемой EUMETSAT в качестве продуктов MSGCLMK или CLM-IODC, являющихся результатом обработки данных спутниковых наблюдений с геостационарных спутников MSG. Подготовка продукта и передача файлов, содержащих информацию о маске облаков, по проведённым в рамках представленной работы измерениям временных затрат, не превышает 3,5 ч. Это вполне приемлемый результат, в частности для обнаружения и оценки интенсивности дождевых ливневых осадков, связанных с зарождением и развитием мезомасштабных конвективных комплексов.

Модельные оценки эффективности

При моделировании оценивались сплошные спектры СВЧ-излучения в диапазоне 10–200 ГГц системы «атмосфера – подстилающая поверхность» в интервале значений коэффициентов отражения земной поверхности от 0,5 до 0,1. Оценки проведены с использованием пакета ARTS (ARTS..., 2020). Флуктуационная чувствительность СВЧ-радиометрических приёмников σ_T была принята постоянной во всём диапазоне частот. Априорные данные по ковариационным матрицам температурно-влажностных характеристик атмосферы получены в результате

статистического анализа данных радиозондовых измерений атмосферных профилей (в безоблачных условиях), содержащихся в базе данных радиозондовых измерений (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). При этом были оценены показатели эффективности применения априорной информации (Саворский и др., 2020), заключающейся в использовании обобщённых представлений о моделировании параметров облаков в летний и зимний периоды. Многолетние данные радиозондовых измерений (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) были использованы как для определения средних многолетних значений температурно-влажностных профилей, так и для формирования ковариационных матриц вариаций параметров этих профилей.

Результаты оценок эффективности применения модельной априорной информации о наличии облачного слоя по методике, описанной в работе (Саворский и др., 2020), представлены на *рис. 2* для профилей температуры (см. *рис. 2а*) и влажности (см. *рис. 2б*) в виде результатов оценки эффективности при моделировании облачного слоя мощностью (толщиной облачного слоя) 2 км с нижней кромкой на высоте 1,2 км и средней водностью $0,00025 \text{ кг/м}^3$. Из *рис. 2* следует, что учёт модельных представлений об облачном слое существенно повышает эффективность использования априорной информации как для температуры, так и для влажности.

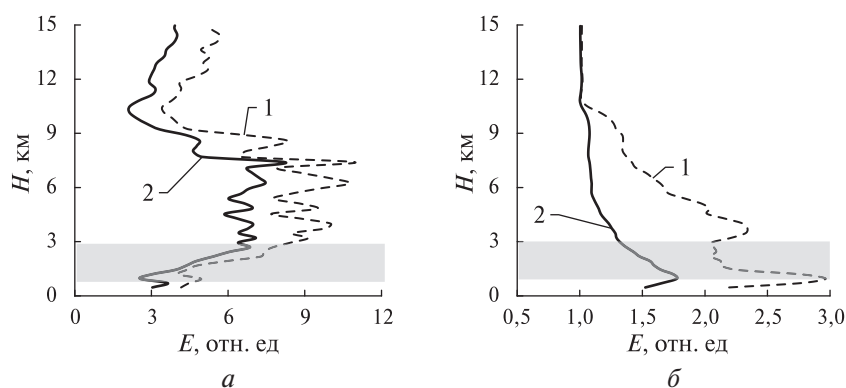


Рис. 2. Профиль эффективности E (Саворский и др., 2020) для температуры (*а*) и влажности (*б*) при наличии облачного слоя на высотах от 1,2 до 3,2 км при флуктуационной чувствительности радиометра 0,1 К (1) и 1,0 К (2); серым цветом отмечено расположение облачного слоя

Введение в модель данных о сомкнутости облачного слоя позволяет скорректировать данные о водозаписе облака и, следовательно, его средней водности. Что в результате позволяет определить эффективность развитого модельного подхода. Так, установлено, что при сомкнутости облачного полога более 80 % учёт разрывности облаков позволяет на 10–15 % скорректировать оценки водозаписа облаков.

Заключение

В результате анализа возможностей современных спутниковых систем атмосферного мониторинга предложена и реализована методика коррекции оценок водозаписа облачности по данным СВЧ-мониторинга. Методика коррекции основана на использовании данных геостационарных спутников по маскам облачности. Разработан общий методический подход, а также показаны возможности современных средств наблюдения, обеспечивающие высокое временное разрешение, способствующее своевременному обнаружению и мониторингу быстроразвивающихся опасных атмосферных явлений типа мезомасштабных конвективных комплексов. Получены асимптотические решения для малых значений оптического пути излучения в нижних слоях атмосферы (под облаками) и для предельных, в земных условиях, значений отражения СВЧ-излучения от поверхности земли. Проведено численное моделирование облачного слоя и подтверждена эффективность разработанных методов оценки.

Работа была поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований в рамках исследовательского проекта № 20-07-00680.

Литература

1. Саворский В. П., Кутуза Б. Г., Аквилонова А. Б., Кибардина И. Н., Панова О. Ю., Данильчев М. В., Широков С. В. Повышение эффективности восстановления температурно-влажностных профилей облачной атмосферы по данным спутниковых СВЧ-спектрометров // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. № 7. С. 658–666. DOI: 10.31857/S0033849420070104.
2. ARTS User Guide. Version 2.2.66 / eds. Eriksson P., Buhler S. 2020. 169 p. URL: https://arts.mi.uni-hamburg.de/misc/arts-doc-stable/uguide/arts_user.pdf.
3. Bauer P., Thorpe A., Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction // Nature. 2015. No. 525. P. 47–55. <https://doi.org/10.1038/nature14956>.
4. Bony S., Stevens B., Frierson D., Jakob C., Kageyama M., Pincus R., Shepherd T., Sherwood S., Siebesma A., Sobel A., Watanabe M., Webb M. Clouds, circulation and climate sensitivity // Nature Geoscience. 2015. No. 8(4). P. 261–268. <https://doi.org/10.1038/NNGEO2398>.
5. Bremen L. V., Ruprecht E., Macke A. Errors in liquid water path retrieval arising from cloud inhomogeneities: The beam-filling effect // Meteorologische Zeitschrift. 2002. No. 11. P. 13–19. DOI: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0013.
6. Christopher S. A., Chou J. Cloud liquid water path comparisons from passive microwave and solar reflectance satellite measurements: Assessment of subfield-of-view cloud effects in microwave retrievals // J. Geophysical Research. 1997. No. 102. P. 19585–19596.
7. Elsaesser G. S., O'Dell C. W., Lebsock M. D., Bennartz R., Greenwald T. J., Wentz F. J. The multi-sensor advanced climatology of liquid water path (MAC-LWP) // J. Climate. 2017. No. 30. P. 10193–10210. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0902.1>.
8. Hilburn K. A., Wentz F. J. Intercalibrated passive microwave rain products from the Unified Microwave Ocean Retrieval Algorithm (UMORA) // J. Applied Meteorology and Climatology. 2008. No. 47. P. 778–794. DOI: 10.1175/2007JAMC1635.1.
9. Lebsock M. D., Su H. Application of active spaceborne remote sensing for understanding biases between passive cloud waterpath retrievals // J. Geophysical Research Atmospheres. 2014. No. 119. P. 8962–8979. DOI: 10.1002/2014JD021568.
10. O'Dell C. W., Wentz F. J., Bennartz R. Cloud liquid water path from satellite-based passive microwave observations: A new climatology over the global oceans // J. Climate. 2008. No. 21. P. 1721–1739. DOI: 10.1175/2007JCLI1958.1.
11. Stephens G. L., Kummerow C. The remote sensing of clouds and precipitation from space: a review // J. Atmospheric Sciences. 2007. No. 64. P. 3742–3765.
12. Stephens G., Christensen M., Andrews T., Haywood J., Malavelle F., Suzuki K., Jing X., Lebsock M., Li J.-L. F., Takahashi H., Sy O. Cloud physics from space // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2019. V. 145. No. 724. P. 2854–2875. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3589>.
13. Wentz F. J., Meissner T. AMSR Ocean Algorithm: Algorithm Theoretical Basis Document. Version 2. RSS Tech. Proposal 121599A-1. 2000. 67 p.
14. Wentz F. J., Spencer R. W. SSM/I rain retrievals within a unified all-weather ocean algorithm // J. Atmospheric Sciences. 1998. No. 55. P. 1613–1627.
15. Werner F., Deneke H. Increasing the spatial resolution of cloud property retrievals from Meteosat SEVIRI by use of its high-resolution visible channel: evaluation of candidate approaches with MODIS observations // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. No. 13. P. 1089–1111. <https://doi.org/10.5194/amt-13-1089-2020>.

Correction of cloud water estimates from satellite monitoring data

V. P. Savorskiy

*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino 141190, Moscow Region, Russia
E-mail: savor@inbox.ru*

One of the most significant systematic errors in determining the parameters of the cloud layer is associated with the inhomogeneity of the cloud layer in the field of view of microwave sensors. The resulting discrepancies in the estimates of the optical path of radiation in clouds, the so-called CLWP, require correction, since these discrepancies can reach two times, for example, in areas of the atmosphere with shallow cumulus convection. This determines the significance and relevance of correcting the CLWP values, since these values determine the water content of clouds and, as a result, probabilistic estimates of the predicted volumes and intensities of rainfall from them. The paper proposes and implements a method for correcting cloud water content estimates based on microwave monitoring data using cloud mask data obtained from the results of synchronous observations of the cloud layer from geostationary platforms in the visible and IR ranges. A general methodological approach has been developed, and the capabilities of modern observation tools are discussed, emphasizing their high temporal resolution contributing to timely detection and monitoring of rapidly developing dangerous atmospheric phenomena such as mesoscale convective complexes (MCCs). Asymptotic solutions are obtained for small values of CLWP in the lower layers of the atmosphere (under clouds) and for the limiting, under terrestrial conditions, values of the reflection of microwave radiation from the Earth's surface.

Keywords: microwave radiometer, brightness temperature, water content of clouds, relative area of clouds

Accepted: 14.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-78-86

References

1. Savorskiy V. P., Kutuza B. G., Akvilonova A. B., Kibardina I. N., Panova O. Yu., Danilychev M. V., Shirokov S. V., Enhancing the efficiency of the reconstruction of the temperature and humidity profiles of the cloud atmosphere by the data of satellite microwave spectrometers, *J. Communications Technology and Electronics*, 2020, Vol. 65, No. 7, pp. 792–799, <https://doi.org/10.1134/S1064226920070104/>.
2. *ARTS User Guide. Version 2.2.66*, Eriksson P., Buhler S. (eds.), 2020, 169 p., accessed: https://arts.mi.uni-hamburg.de/misc/arts-doc-stable/uguide/arts_user.pdf.
3. Bauer P., Thorpe A., Brunet G., The quiet revolution of numerical weather prediction, *Nature*, 2015, No. 525, pp. 47–55, <https://doi.org/10.1038/nature14956>.
4. Bony S., Stevens B., Frierson D., Jakob C., Kageyama M., Pincus R., Shepherd T., Sherwood S., Siebesma A., Sobel A., Watanabe M., Webb M., Clouds, circulation and climate sensitivity, *Nature Geoscience*, 2015, No. 8(4), pp. 261–268, <https://doi.org/10.1038/NGEO2398>.
5. Bremen L. V., Ruprecht E., Macke A., Errors in liquid water path retrieval arising from cloud inhomogeneities: The beam-filling effect, *Meteorologische Zeitschrift*, 2002, No. 11, pp. 13–19, DOI: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0013.
6. Christopher S. A., Chou J., Cloud liquid water path comparisons from passive microwave and solar reflectance satellite measurements: Assessment of subfield-of-view cloud effects in microwave retrievals, *J. Geophysical Research*, 1997, No. 102, pp. 19585–19596.
7. Elsaesser G. S., O'Dell C. W., Lebsock M. D., Bennartz R., Greenwald T. J., Wentz F. J., The multi-sensor advanced climatology of liquid water path (MAC-LWP), *J. Climate*, 2017, No. 30, pp. 10193–10210, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0902.1>.
8. Hilburn K. A., Wentz F. J., Intercalibrated passive microwave rain products from the Unified Microwave Ocean Retrieval Algorithm (UMORA), *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2008, No. 47, pp. 778–794, DOI: 10.1175/2007JAMC1635.1.
9. Lebsock M. D., Su H., Application of active spaceborne remote sensing for understanding biases between passive cloud waterpath retrievals, *J. Geophysical Research Atmospheres*, 2014, No. 119, pp. 8962–8979, DOI: 10.1002/2014JD021568.

10. O'Dell C. W., Wentz F. J., Bennartz R., Cloud liquid water path from satellite-based passive microwave observations: A new climatology over the global oceans, *J. Climate*, 2008, No. 21, pp. 1721–1739, DOI: 10.1175/2007JCLI1958.1.
11. Stephens G. L., Kummerow C., The remote sensing of clouds and precipitation from space: a review, *J. Atmospheric Sciences*, 2007, No. 64, pp. 3742–3765.
12. Stephens G., Christensen M., Andrews T., Haywood J., Malavelle F., Suzuki K., Jing X., Lebsock M., Li J.-L. F., Takahashi H., Sy O., Cloud physics from space, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2019, Vol. 145, No. 724, pp. 2854–2875, <https://doi.org/10.1002/qj.3589>.
13. Wentz F. J., Meissner T., *AMSR Ocean Algorithm, Algorithm Theoretical Basis Document, Version 2, AMSR Ocean Algorithm, RSS Tech. Proposal 121599A-1*, 2000, 67 p.
14. Wentz F. J., Spencer R. W., SSM/I rain retrievals within a unified all-weather ocean algorithm, *J. Atmospheric Sciences*, 1998, No. 55, pp. 1613–1627.
15. Werner F., Deneke H., Increasing the spatial resolution of cloud property retrievals from Meteosat SEVIRI by use of its high-resolution visible channel: evaluation of candidate approaches with MODIS observations, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, No. 13, pp. 1089–1111, <https://doi.org/10.5194/amt-13-1089-2020>.