

## Использование информации спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в системе усвоения данных Гидрометцентра России

Д. Р. Гайфулин\*, М. Д. Цырульников\*, А. Б. Успенский\*\*,  
Е. К. Крамчанинова\*\*, С. А. Успенский\*\*, П. И. Свиренко\*, М. Е. Горбунов\* \*\*\*

*Кратко описан микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ, установленный на борту отечественного полярно-орбитального метеоспутника “Метеор-М” № 2. Рассмотрены процедуры коррекции смещений и контроля качества спутниковых данных, необходимые для их эффективного усвоения. Кратко описана оперативная система глобального усвоения данных Гидрометцентра России. Приведены результаты численных экспериментов по усвоению данных МТВЗА-ГЯ в шести “температурных” каналах. Показано, что усвоение этих данных дает заметное повышение точности прогноза погоды на трое суток в Южном полушарии. В Северном полушарии эффект от использования данных МТВЗА-ГЯ нейтральный.*

**Ключевые слова:** микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ, усвоение данных, коррекция смещения, контроль качества, численный прогноз погоды.

### 1. Введение

В настоящее время спутниковые наблюдения атмосферы Земли являются основным источником информации для численного прогноза погоды. Один из важнейших видов спутниковых наблюдений — измерения уходящего излучения системы подстилающая поверхность — атмосфера в микроволновом и инфракрасном диапазонах спектра, они чувствительны к температуре и влажности в атмосфере. По сравнению с инфракрасными микроволновые наблюдения всепогодны: они не подвержены влиянию облаков, за исключением наиболее мощных.

В данной работе исследована информативность данных измерений российского спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ путем оценки их вклада в систему глобального усвоения данных Гидрометцентра России (сравнительно со вкладом данных других спутниковых микроволновых наблюдений).

### 2. Краткое описание аппаратуры МТВЗА-ГЯ

Микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ (модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы) с функциями сканера и атмосферного зондировщика входит в состав целевой аппаратуры космического аппарата (КА) “Метеор-М” № 2 [1]. Радиометрические каналы сканера чувствительны к параметрам подстилающей поверхности, а каналы зондировщика — к профилям температуры и влажности в атмосфере. По центральным частотам каналов атмосферного зондировщика аппаратура МТВЗА-ГЯ близка к зарубежным аналогам —

\* Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации; e-mail: gayfulin@rambler.ru.

\*\* Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”.

\*\*\* Институт физики атмосферы Российской академии наук.

микроволновым радиометрам AMSU-A, MHS, AMSU-B (КА серий “NOAA” и “Metop”), ATMS (КА “SNPP”) и SSMIS (КА серии “DMSP”), см. <http://www.wmo-sat.info/oscar/>. Каналы зондировщика МТВЗА-ГЯ имеют центральные частоты в линиях поглощения кислорода и водяного пара: 10 каналов температурного зондирования и 3 канала влажностного зондирования. Полоса обзора прибора составляет 1500 км, пространственное разрешение — 16—198 км (в зависимости от канала), геометрия сканирования — круговая коническая. Дополнительные детали описания МТВЗА-ГЯ можно найти в работах [1, 6].

Бортовая (внутренняя) калибровка радиометрических каналов МТВЗА-ГЯ позволяет представить регистрируемые сигналы в терминах антенных значений температуры, которые вследствие разных мешающих факторов могут заметно отличаться от значений яркостной температуры, используемых в приложениях. Летные испытания и последующая эксплуатация КА “Метеор-М” № 2 показали необходимость внешней калибровки данных МТВЗА-ГЯ. Внешняя калибровка, т. е. переход от антенных значений к яркостной температуре, проводилась по методике работы [6], причем в качестве опорных данных были использованы результаты радиационных расчетов яркостной температуры с помощью модели радиационного переноса RTTOV v. 11 [20], адаптированной к данным МТВЗА-ГЯ. Входными данными для радиационных расчетов являлись 6-часовые прогнозы GFS NCEP, имеющиеся в открытом доступе (<http://www.emc.ncep.noaa.gov/>) и в базе данных Гидрометцентра России.

На этапе предварительной обработки данных МТВЗА-ГЯ формируются файлы результатов измерений яркостной температуры с пространственным разрешением (размером один пиксель) 48 × 48 км для каналов температурного зондирования. Температурные каналы МТВЗА-ГЯ условно подразделены на тропосферные (каналы 15—19) и стратосферные (каналы 20—24) в зависимости от весовых функций, определяющих вклад температуры на данной высоте в измеряемую яркостную температуру. Графики весовых функций каналов 15—20 представлены на рис. 1. Их нумерация в данной статье соответствует принятой в модели RTTOV. Учет более “высоких” стратосферных каналов лимитируется используемой в Гидрометцентре России прогностической моделью ПЛАВ [5] с верхним уровнем 5 гПа.

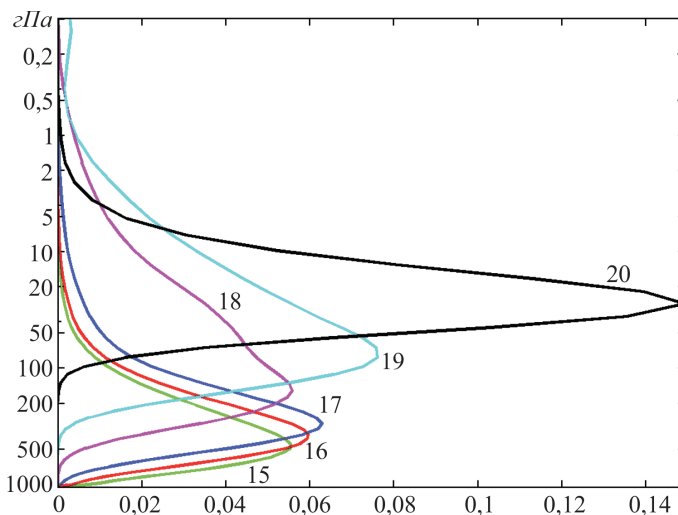


Рис. 1. Весовые функции каналов 15—20 МТВЗА-ГЯ. Номер канала указан около соответствующей кривой.

### 3. Коррекция смещений

Под коррекцией смещений в усвоении данных радиационных измерений понимается коррекция ошибок наблюдений. Ошибкой наблюдения назовем величину  $\eta = X^o - H(X^t)$ , где  $X^o$  — результаты наблюдений;  $X^t$  — неизвестное истинное состояние атмосферы;  $H$  — используемый при усвоении данных оператор наблюдений. Оператором наблюдений или прямой моделью называется функция, аргументом которой является состояние атмосферы (на заданной сетке), а значением — приближение к наблюдаемой величине  $X^o$ . В данной работе в качестве оператора наблюдений для усвоения данных микроволновых спутниковых измерений использована упоминавшаяся выше модель RTTOV.

Авторы применяют коррекцию смещений, состоящую из двух этапов: линейной регрессии по предикторам и нелинейной регрессии по географической широте.

#### 3.1. Линейная коррекция по предикторам

Поскольку прямая модель  $H$ , как и любая модель радиационного переноса, неидеальна, введем в рассмотрение точный оператор наблюдений  $H^t$ . Тогда ошибку наблюдения можно представить следующим образом:

$$\eta = X^o - H(X^t) = (X^o - H^t(X^t)) + (H^t(X^t) - H(X^t)). \quad (1)$$

Первое слагаемое в правой части (1) будем называть ошибкой измерения, а второе — ошибкой оператора наблюдений  $H$ . Важно, что согласно формуле (1) ошибка измерения является частью ошибки наблюдения. Ошибка измерения возникает из-за погрешностей калибровки, а также вследствие разных шумов. Для нее предполагаем следующую простую модель:

$$X^o - H^t(X^t) = b_m + \eta_m, \quad (2)$$

где  $b_m = E(X^o - H(X^t))$  — смещение ошибки измерения,  $\eta_m$  — случайная ошибка измерения с нулевым математическим ожиданием, не зависящая от  $X^t$ .

Ошибка оператора наблюдений возникает из-за неточного учета разных факторов, определяющих яркостную температуру. Разность  $H^t(X^t) - H(X^t)$  является сложной и неизвестной функцией от  $X^t$ . Следуя [15], аппроксимируем ее с помощью следующей модели:

$$H^t(X^t) - H(X^t) = \sum_{i=1}^n c_i P_i + \eta_H \quad (3)$$

Здесь  $P_i$  — зависящие от  $X^t$  предикторы;  $c_i$  — коэффициенты;  $\eta_H$  — случайный шум. В данной работе использованы три предиктора [15]:  $P_1 = 1$ ,  $P_2 = H_{300} - H_{850}$ ,  $P_3 = H_{50} - H_{200}$ , где  $H_i$  — геопотенциальная высота, соответствующая уровню в  $i$  гектопаскалей.

**Оценка коэффициентов коррекции смещений.** Для оценивания коэффициентов коррекции необходима обучающая выборка ошибок наблюдения. Так как данные об истинном состоянии атмосферы недоступны, то вместо них используем краткосрочный прогноз  $X^f$ , также называемый в усвоении данных первым приближением при анализе. Заметим, что  $X^f$  есть наилучшая доступная оценка  $X^t$ , не использующая данных текущих наблюдений. Таким образом, для оценки коэффициентов коррекции  $c_i$  величину  $X^o - H(X^t)$  заменим на  $X^o - H(X^f)$ , так называемый инкремент наблюдения. Исходя из уравнений (1)—(3) инкремент наблюдения может быть представлен в виде следующей суммы:

$$\begin{aligned}
 X^o - H(X^f) &= (X^o - H^f(X^f)) + (H^f(X^f) - H(X^f)) + (H(X^f) - H(X^f)) = \\
 &= \sum_{i=1}^3 c_i P_i + \eta_H + \eta_m + \eta_f.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Здесь смещение ошибки измерения  $b_m$  включено в  $c_1$ . Через  $\eta_f$  обозначена величина  $H(X^f) - H(X^f)$  (ошибка прогноза в терминах яркостной температуры), возможным смещением которой авторы пренебрегли по сравнению со смещением ошибки наблюдений.

Коэффициенты  $c_i$  находятся минимизацией суммы квадратов инкрементов наблюдения (4) по текущим данным для каждого канала независимо. Применяется классический метод наименьших квадратов. Вычисленные коэффициенты  $c_i$  подвергаются усреднению по времени для подавления шума:

$$\bar{c}_i(t+1) = a\bar{c}_i(t) + (1-a)c_i(t),
 \tag{5}$$

где  $\bar{c}_i$  — усредненный по времени коэффициент  $c_i$ ;  $t$  — номер временного шага;  $a$  — параметр осреднения. Согласно численным экспериментам, оптимальное значение  $a = 0,93$ , что соответствует осреднению по 3—4 сут. Заметим, что в формуле (5) коэффициенты  $\bar{c}_i(t)$  вычисляются на  $(t - 1)$ -м шаге. Если на шаге с номером  $t$  коэффициенты  $\bar{c}_i(t)$  по какой-то причине не были вычислены (например, на первом цикле усвоения), то полагаем  $\bar{c}_i(t+1)$  равным  $c_i(t)$ .

**Применение коррекции смещений.** Перед усвоением данные спутниковых наблюдений корректируются по формуле

$$X_{\text{cor}}^o(j) = X^o(j) - \sum_{i=1}^3 \bar{c}_i P_i(j),$$

где  $X_{\text{cor}}^o(j)$  обозначает  $j$ -е наблюдение после коррекции. Если коэффициенты  $\bar{c}_i$  не были вычислены на предыдущем временном шаге, то на данном этапе не производится коррекция смещений и не усваиваются наблюдения, но, как было сказано выше, значения  $\bar{c}_i$  вычисляются для следующего шага.

### 3.2. Нелинейная широтная коррекция

Из уравнения (4) следует, что инкремент наблюдения после линейной коррекции имеет вид

$$y_{\text{cor}} = X_{\text{cor}}^o - H(X^f) = \eta_m + \eta_H + \eta_f.$$

Численные эксперименты показывают, что  $y_{\text{cor}}$  имеет остаточную систематическую ошибку, которая нелинейно зависит от широты (не показано). Так как случайные ошибки  $\eta_m$  и  $\eta_f$  предполагаются несмещенными, то допускается зависимость математического ожидания случайной ошибки оператора наблюдений  $\eta_H$  от широты  $\varphi$ :  $E\eta_H = g(\varphi)$ . Для того чтобы оценить функцию  $g(\varphi)$ , авторы, следуя [7], применили непараметрическое, так называемое ядерное, сглаживание. Пусть  $\varphi_j$  — широта наблюдения, имеющего номер  $j$ . На каждом временном шаге вычислим регрессионную функцию  $\hat{g}(\varphi)$  на сетке с шагом  $0,1^\circ$  широты по формуле

$$\hat{g}(\varphi) = \frac{\sum_j K_h(\varphi - \varphi_j) y_{\text{cor}}(j)}{\sum_j K_h(\varphi - \varphi_j)},$$

где  $K_h(\varphi)$  — так называемое ядро Епанечникова:

$$K_h(\varphi) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{\varphi}{h}\right)^2 & \text{при } |\varphi| \leq h, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Параметр  $h$  определяет степень сглаживания, он выбран равным  $5^\circ$  широты. Для дополнительного подавления шума применяется осреднение по времени, аналогичное выражению (5):

$$\bar{g}_{t+1}(\varphi) = a\bar{g}_t(\varphi) + (1-a)\hat{g}_t(\varphi). \tag{6}$$

Здесь  $\bar{g}_t(\varphi)$  — усредненная по времени регрессионная функция;  $t$  — номер временного шага. Функция  $\bar{g}_t(\varphi)$  вычисляется на  $(t - 1)$ -м временном шаге. Если из-за определенных причин она не была ранее вычислена, аналогично первому этапу коррекции смещений (раздел 3.1) полагаем  $\bar{g}_{t+1}(\varphi) = \hat{g}_t(\varphi)$ . Если функция  $\bar{g}_t(\varphi)$  была вычислена на предыдущем временном шаге, широтная коррекция проводится по формуле

$$X_{\text{lat cor}}^o(j) = X_{\text{cor}}^o(j) - \bar{g}_t(\varphi_j),$$

здесь  $X_{\text{lat cor}}^o(j)$  — значение  $j$ -го наблюдения после широтной коррекции. Аналогично разделу 3.1 вычисление функции  $\bar{g}(\varphi)$  проводится для каждого канала в отдельности.

#### 4. Контроль качества и прореживание наблюдений

Результаты наблюдений МТВЗА-ГЯ подвергаются нескольким проверкам с целью отбросить данные, содержащие неприемлемо большие ошибки. Во-первых, чувствительные к поверхности каналы не используют над высокими формами рельефа (наблюдения в канале 15 МТВЗА-ГЯ отбрасываем при высоте рельефа более 1000 м, в канале 16 — более 1500 м). Кроме того, данные каналы не используются над океаном при наличии льда. Также проводится проверка на горизонтальную согласованность результатов наблюдений (изменчивость поля данных спутниковых наблюдений не должна превосходить некоторого порога, зависящего от номера канала). Наконец, контролируются отклонения от первого приближения  $H(X^I)$  в терминах яркостной температуры: величина  $X_{\text{lat cor}}^o - H(X^I)$  также не должна превосходить некоторого порогового значения, зависящего от номера канала. Доля результатов наблюдений, отброшенных из-за большого отклонения от первого приближения, составляет порядка 15% для канала 17 и не превышает 2—3% для остальных усваиваемых каналов МТВЗА-ГЯ.

Как показано в работе [14], ошибки микроволновых спутниковых наблюдений, определенные в разделе 3.1, коррелированы в пространстве и времени. При этом источником корреляции являются, по всей видимости, ошибки оператора наблюдений, которые зависят от состояния атмосферы, которое, в свою очередь, как известно, коррелирует в пространстве. Однако представленная система анализа (см. ниже раздел 5), так же как и многие ее аналоги, не учитывает коррелированность ошибок наблюдений. Это компенсируется прореживанием данных наблюдений с целью исключения наиболее сильно коррелированных близких значений [11]. Численные эксперименты показали, что оптимальным является выбор каждого 10-го значения в строке и каждой 10-й строки для усвоения (при этом расстояние между соседними усваиваемыми результатами наблюдений составляет около 120 км).

## 5. Оперативная система усвоения данных Гидрометцентра России

Целью усвоения данных является формирование наиболее точной оценки текущего состояния атмосферы на основе всех имеющихся (т. е. настоящих и прошлых) данных наблюдений с помощью прогностической модели. Методология усвоения данных состоит в циклически повторяющихся шагах анализа и прогноза. На шаге анализа формируются так называемые поля анализа, являющиеся искомой оценкой текущего состояния системы. На шаге прогноза прогностическая модель системы стартует со сформированных полей анализа как начальных условий и переносит информацию о прошлых результатах наблюдений вперед по времени, формируя поля прогноза.

Система глобального циклического усвоения данных Гидрометцентра России основана на технологии трехмерного вариационного усвоения данных 3D-Var (о методологии 3D-Var см., например, [18]). На шаге прогноза используется полулагранжева модель ПЛАВ [5]. Задача анализа 3D-Var состоит в поиске минимума

$$J(X) = \frac{1}{2}(X - X^f)^T B^{-1}(X - X^f) + \frac{1}{2}(X^o - H(X))^T R^{-1}(X^o - H(X)) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $X$  — вектор, представляющий искомое состояние атмосферы на сетке анализа;  $X^f$  — вектор, представляющий поле прогноза (первого приближения);  $X^o$  — вектор данных наблюдений;  $B$  — матрица ковариаций ошибок прогноза;  $R$  — матрица ковариаций ошибок наблюдений;  $H$  — оператор наблюдений (см. раздел 3.1). В случае линейного (линеаризованного) оператора  $H$  функция потерь  $J(X)$  (7) имеет единственный минимум (анализ):

$$X^a = X^f + (B^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} (X^o - H X^f). \quad (8)$$

Схема анализа 3D-Var полностью разработана и создана авторами данной статьи, работающими в Гидрометцентре России (единственный заимствованный элемент — модель RTTOV). Заметим, что ядро схемы 3D-Var используется и в оперативной системе усвоения океанографических данных Гидрометцентра России [4].

### 5.1. Модель пространственных ковариаций ошибок прогноза

Основным отличительным признаком различных схем вариационного усвоения (трехмерного или четырехмерного) является матрица ковариаций  $B$ . В описываемой схеме матрица  $B$  представляется предложенной авторами моделью на основе трехмерных пространственных фильтров. Вектор ошибок прогноза  $\xi$  постулируется удовлетворяющим уравнению

$$S\xi = V\alpha, \quad (9)$$

где  $S$  и  $V$  — пространственные операторы (матрицы);  $\alpha$  — вектор, представляющий пространственный белый шум. Более конкретно, модель (9) имеет вид

$$\xi_k = \sum_{j=k-q(k)}^{k-1} F_{kj} \xi_j + U_k \alpha_k, \quad (10)$$

где  $k$  — уровень по вертикали;  $F_{kj}$  и  $U_k$  — горизонтальные локально изотропные линейные операторы на сфере;  $q(k)$  — задаваемый порядок авторегрессии (от 0 до 3). Заметим, что на нижнем уровне авторегрессионный член отсутствует:  $\xi_1 = U_1 \alpha_1$ . Таким образом, стохастическая модель пространственного поля ошибок прогноза является моделью авторегрессии по вертикали, при этом коэф-



коэффициенты авторегрессии являются горизонтальными линейными операторами. Авторегрессионный характер модели обеспечивает непосредственную (и потому быструю) обратимость матрицы  $S$  в уравнении (9). Действительно, как следует из уравнений (9) и (10), матрица  $S$  — блочная нижнетреугольная с единичными матрицами в блоках, стоящих на главной диагонали, поэтому решение системы уравнений  $Sx = y$  производится методом прямой подстановки.

Формирующие операторы  $S$  и  $V$  описанной модели ковариаций оцениваются в три этапа. Во-первых, локальная горизонтальная корреляционная функция каждого так называемого несбалансированного поля анализа раскладывается в ряд по многочленам Лежандра на всех уровнях анализа. Во-вторых, в спектральном пространстве, для каждого волнового числа независимо, коэффициенты вертикальной авторегрессии оцениваются с помощью уравнений Юла — Уокера [8]. В-третьих, вычисленные спектры коэффициентов авторегрессии используются для оптимального синтеза [3] горизонтальных дискретных операторов  $F_{kj}$  и  $U_k$  (см. уравнение (10)). Локальная корреляционная функция задается как положительно определенная функция горизонтального расстояния для каждого вертикального уровня и зависит от широты.

В качестве несбалансированных полей использованы геопотенциал, несбалансированная функция тока и потенциал скорости, а также псевдоотносительная влажность.

## 5.2. Численная схема анализа

Из уравнения (9) видно, что может быть легко вычислен (несимметричный) квадратный корень  $W$  из матрицы  $B$ . Действительно,  $\xi = S^{-1}V\alpha = W\alpha$ , откуда получаем  $B = E \xi\xi^T = WW^T$ , так как ковариационная матрица вектора  $\alpha$  — единичная. Наличие такой факторизации матрицы  $B$  позволяет, как это традиционно делается [9], эффективно преобусловить систему линейных уравнений (8), т. е. уменьшить число обусловленности матрицы системы уравнений (равное, в случае симметричной положительно определенной матрицы, отношению максимального собственного значения матрицы к ее минимальному собственному значению). Необходимость преобусловливания вызвана тем, что в сумме  $B^{-1} + H^T R^{-1} H$  (см. (8)) первая матрица имеет как большие, так и маленькие положительные собственные числа, тогда как вторая матрица, как правило (если число наблюдений меньше числа оцениваемых степеней свободы, т. е. размерности вектора состояния), вырождена. В результате число обусловленности матрицы  $B^{-1} + H^T R^{-1} H$  системы уравнений 3D-Var оказывается неприемлемо высоким. Если преобразовать уравнение (8) к следующему виду:

$$X^a = X^f + W(I + W^T H^T R^{-1} H W)^{-1} W^T H^T R^{-1} (X^{\text{obs}} - H X^f) \quad (11)$$

(где  $I$  — единичная матрица), то решать систему линейных уравнений нужно уже со значительно лучше обусловленной матрицей  $I + W^T H^T R^{-1} H W$ , у которой собственные числа ограничены снизу единицей. Система уравнений анализа (11) решается численно методом сопряженных градиентов [2].

С помощью системы 3D-Var анализируются поля температуры, компонентов горизонтального ветра и удельной влажности на модельных уровнях. Поля анализа формируются непосредственно на сетке модели. Поля инкрементов анализа вычисляются на нерегулярной широтно-долготной сетке с разрешением  $\sim 165$  км по горизонтали и на 38 изобарических уровнях по вертикали от 1075 до 0,5 гПа.

### 5.3. Усваиваемые данные наблюдений

На шаге анализа оперативная схема 3D-Var усваивает данные следующих видов наблюдений.

1. Контактные наблюдения: приземные, приводные (корабли и буи), радиозондовые, самолетные.

2. Спутниковые радиационные микроволновые наблюдения (AMSU-A и MHS).

3. Радиозатменные наблюдения. Усваиваются, во-первых, данные наблюдений системы COSMIC [19], которые представляют собой амплитуды и фазовые задержки проходящих через атмосферу сигналов радионавигационной системы GPS. Обработка этих данных производится при помощи метода канонических преобразований, методов радиологической фильтрации и статистической регуляризации [12, 13]. Во-вторых, усваиваются профили показателя преломления, восстановленные из аналогичных радиозатменных наблюдений с помощью приемника GRAS, установленного на спутниках серии “Metop”. Обработка радиозатменных наблюдений GRAS и восстановление профилей показателя преломления производится в EUMETSAT и ROM SAF [16] при помощи пакета программ ROPP [10], в котором также реализованы методы обработки, описанные в работах [12, 13].

4. Наблюдения за ветром по движению облаков и полям влажности, проводимые в Кооперативном институте спутниковой метеорологии при Университете штата Висконсин, США [17]. В схеме 3D-Var усваиваются результаты трех видов таких наблюдений — AMV-Geo, AMV-Polar и AMV-LeoGeo. Первый вид (AMV-Geo) основан на наблюдениях с геостационарных спутников и покрывает пояса от экватора до 60° широты в обоих полушариях; второй вид (AMV-Polar) — на наблюдениях с полярно-орбитальных спутников (покрывает полярные шапки выше 70° широты); третий вид (AMV-LeoGeo) — гибридный, он покрывает широтные зоны 60—70° южной и северной широты.

5. Наблюдения приводного ветра по данным скаттерометра ASCAT [21].

### 6. Усвоение данных МТВЗА-ГЯ

Данные наблюдений в шести каналах МТВЗА-ГЯ (каналы 15—20) были включены в систему 3D-Var аналогично данным AMSU-A. С учетом прореживания и контроля качества за сутки усваивалось порядка 60 тысяч данных наблюдений за яркостной температурой для каждого канала. Отбирались данные во временном окне  $\pm 3$  ч от срока усвоения.

#### 6.1. Результаты сравнения данных измерений с расчетными значениями яркостной температуры по 6-часовым прогнозам NCEP и ПЛАВ

В качестве предварительной проверки качества наблюдений МТВЗА-ГЯ и с целью подбора оптимальных параметров усвоения авторы сравнили прошедшие процедуру коррекции смещений и контроля качества результаты наблюдений со значениями яркостной температуры, вычисленными по данным 6-часового прогноза NCEP. Усвоение данных наблюдений МТВЗА-ГЯ при этом не производили. В таблице приведены результаты сравнения для одной недели в течение июля 2016 г. Видно, что основной вклад в уменьшение среднеквадратического отклонения дает линейная коррекция по предикторам, но и эффект от широтной коррекции также всюду положительный.



**Среднеквадратическое отклонение (К) результатов наблюдений МТВЗА-ГЯ от значений яркостной температуры по 6-часовым прогнозам NCEP**

Данные МТВЗА-ГЯ	Канал					
	15	16	17	18	19	20
До коррекции смещений	0,80	0,98	1,72	0,81	1,28	1,09
После линейной коррекции по предикторам	0,75	0,69	1,31	0,67	0,77	0,85
После линейной коррекции по предикторам и широтной коррекции	0,74	0,65	1,08	0,62	0,73	0,77

Сопоставим результаты наблюдений МТВЗА-ГЯ и AMSU-A с первым приближением, вычисляемым системой циклического усвоения данных (6-часовым прогнозом ПЛАВ):

— для МТВЗА-ГЯ:

Канал	15	16	17	18	19	20
$f, ГГц$	52,8	53,3	53,8	54,6	55,63	57,3
$\sigma, К$	0,70	0,69	1,33	0,67	0,86	1,06

— для AMSU-A:

Канал	4	5	6	7	8	9
$f, ГГц$	52,8	53,6	54,4	54,9	55,5	57,3
$\sigma, К$	0,70	0,40	0,31	0,42	0,40	0,47

Здесь  $f$  — центральная частота,  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение, частоты каналов МТВЗА-ГЯ и AMSU-A, находящихся в одном “столбце”, приблизительно совпадают. При этом усваивались данные наблюдений как МТВЗА-ГЯ, так и AMSU-A со спутника “NOAA-19”. Это было сделано, чтобы данные МТВЗА-ГЯ и AMSU-A были поставлены в одинаковые условия по отношению к общему первому приближению и, таким образом, сравнение было корректным. Спутник “NOAA-19” был выбран, поскольку его орбита не совпадает с орбитой спутника “Метеор-М” № 2, так что при совместном усвоении данных наблюдений этих двух спутников они дополняли друг друга. Видно, что среднеквадратические отклонения для данных наблюдений МТВЗА-ГЯ приблизительно в 1,5—2 раза больше, чем таковые для аналогичных каналов радиометра AMSU-A (для канала № 17 МТВЗА-ГЯ — в ~4,3 раза), кроме канала 15 МТВЗА-ГЯ, у которого точность оказалась соизмеримой с точностью канала 4 AMSU-A.

**6.2. Оценка информативности данных МТВЗА-ГЯ по результатам численного прогноза погоды**

Эксперименты проводились для двух двухнедельных периодов — в январе и июле 2016 г. в следующих конфигурациях:

- без использования данных микроволновых наблюдений;
- с использованием результатов наблюдений МТВЗА-ГЯ без учета данных AMSU-A;
- с использованием наблюдений радиометра AMSU-A без учета данных МТВЗА-ГЯ.

В этих экспериментах был выбран спутник “МЕТОР-A”, орбита которого близка к орбите КА “Метеор-М” № 2, поскольку одновременное усвоение данных МТВЗА-ГЯ и AMSU-A не производилось.

Показателем качества разных конфигураций системы усвоения служили прогнозы погоды на трое суток, которые запускались каждые 12 ч (в сроки 0 и 12 ч) по данным анализов системы. Верификация проводилась по данным оперативного анализа Гидрометцентра России.

На рис. 2 изображена среднеквадратическая ошибка прогноза геопотенциала на 3 сут в январе 2016 г. Видно, что эффект от добавления микроволновых наблюдений различен в Северном и Южном полушариях, что связано со значительно меньшим числом контактных наблюдений в Южном полушарии. В Северном полушарии заметный положительный эффект наблюдается только на уровнях от 50 до 150 гПа, а на остальных уровнях эффект нейтральный. В то же время в Южном полушарии видно равномерное уменьшение среднеквадратической ошибки прогноза по сравнению с ситуацией отсутствия учета данных других микроволновых наблюдений. Аналогичная картина наблюдается и для прогноза температуры (не показано). При усвоении наблюдений МТВЗА-ГЯ ошибка прогноза температуры на трое суток на изобарической поверхности 850 гПа уменьшается в Северном полушарии с 2,74 до 2,72 К, а в Южном — с 3,16 до 3,06 К.

Заметим, что в оперативном анализе (используемом для верификации) не усваивались данные МТВЗА-ГЯ, при этом данные AMSU-A учитывались как непосредственно, так и косвенно через 6-часовой прогноз NCEP (играющий роль первого приближения при анализе), в котором есть существенный вклад данных наблюдений AMSU-A в предыдущие сроки. Это создает некоторое преимущество для данных AMSU-A по сравнению с данными МТВЗА-ГЯ. Однако значимость этого преимущества мала, так как среднеквадратическая ошибка 72-часового прогноза намного больше ошибки анализа. Действительно, для геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа в Северном полушарии, как видно на рис. 2, последняя равна примерно 45 м. В то же время среднеквадратическая ошибка оперативного анализа оценивается сверху величиной 10 м (по данным сравнения с радиозондовыми измерениями). Как легко видеть, различие величины ошибок прогноза и анализа в 4,5 раза делает вклад

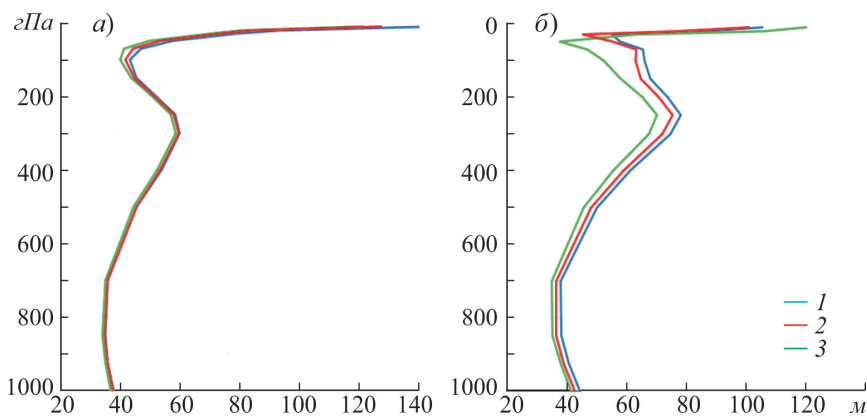


Рис. 2. Среднеквадратическая ошибка 72-часового прогноза геопотенциала.

а) Северное полушарие; б) Южное полушарие. 1 — конфигурация без использования микроволновых наблюдений; 2 — с усвоением наблюдений МТВЗА-ГЯ; 3 — с усвоением наблюдений AMSU-A спутника “МЕТОР-А”.

ошибок анализа в среднеквадратическую разность “прогноз минус анализ” равным примерно 2,5%, что пренебрежимо мало.

Можно сделать вывод, что эффект от усвоения данных МТВЗА-ГЯ уступает эффекту от усвоения результатов наблюдений AMSU-A, но тем не менее остается ощутимо положительным. Эксперименты по усвоению данных МТВЗА-ГЯ за июль 2016 г., результаты которых здесь не приведены, показывают в целом аналогичную картину.

Авторы также проводили эксперименты по одновременному усвоению наблюдений AMSU-A и МТВЗА-ГЯ, в этой ситуации эффект от усвоения данных МТВЗА-ГЯ в обоих полушариях нейтральный.

## 7. Заключение

Сравнение данных МТВЗА-ГЯ с расчетными значениями яркостной температуры по 6-часовым прогнозам ПЛИАВ показало, что в большинстве проанализированных каналов измерения МТВЗА-ГЯ имеют ошибку, в полтора-два раза большую, чем данные AMSU-A. В Северном полушарии эффект от внедрения наблюдений МТВЗА-ГЯ нейтральный, в Южном — ощутимо положительный.

При наличии наблюдений AMSU-A эффект от учета данных МТВЗА в обоих полушариях нейтральный.

Авторы выражают благодарность разработчику аппаратуры МТВЗА-ГЯ И. В. Черному за участие в создании процедуры внешней калибровки спутниковых данных и ценные обсуждения, а также П. Райеру из NWP SAF (EUMETSAT) за адаптацию модели RTTOV к данным МТВЗА-ГЯ. Авторы признательны М. А. Толстых за предоставленную им прогностическую модель ПЛИАВ, а также благодарны К. Велдену и Дж. Кею за предоставляемые ими в оперативном режиме наблюдения за ветром AMV, сотрудникам COSMIC за предоставление доступа к оперативным наблюдениям амплитуд и фазовых задержек, сотрудникам ROM SAF за предоставляемые ими оперативные радиозатменные измерения показателя преломления воздуха и сотрудникам Королевского метеорологического института (Нидерланды) за доступ к оперативным данным о ветре по данным скаттерометра ASCAT. Авторы высоко оценивают содействие Е. А. Аверьяновой (Авиаметтелеком Росгидромета) в оперативном предоставлении разнообразных данных спутниковых наблюдений.

## Литература

1. Асмус В. В., Загребяев В. А., Макриденко Л. А. и др. Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии “Метеор-М”. — Метеорология и гидрология, 2014, № 12, с. 5—16.
2. Бахвалов Н. С. Численные методы. — М., Наука, 1975.
3. Гордин В. А. Математические задачи гидродинамического прогноза погоды. Вычислительные аспекты. — Л., Гидрометеоздат, 1987.
4. Зеленко А. А., Вильфанд Р. М., Реснянский Ю. Д. и др. Система усвоения океанографических данных и ретроспективный анализ гидрофизических полей Мирового океана. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2016, т. 52, № 4, с. 501—513.
5. Толстых М. А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. — М., Обнинск, ОАО ФОП, 2010.
6. Успенский А. Б., Асмус В. В., Козлов А. А. и др. Абсолютная калибровка каналов атмосферного зондирования спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ. — Исследования Земли из космоса, 2016, № 5, с. 57—70.

- 7. Хардле В.** Прикладная непараметрическая регрессия. /Пер. с англ. — М., Мир, 1993.
- 8. Brockwell P. J. and Davis R. A.** Time Series: Theory and Methods. — Springer Science & Business Media, 2013.
- 9. Courtier P., Andersson E., Heckley W., et al.** The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var). I: Formulation. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1998., vol. 124, pp. 1783—1807.
- 10. Culverwell I. D., Lewis H. W., Offiler D., et al.** The Radio Occultation Processing Package, ROPP. — Atmos. Meas. Tech., 2015, vol. 8, pp. 1887—1899.
- 11. Dando M. L., Thorpe A. J., and Eyre J. R.** The optimal density of atmospheric sounder observations in the Met Office NWP system. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2007, vol. 133, pp. 1933—1943.
- 12. Gorbunov M. E.** Canonical transform method for processing GPS radio occultation data in lower troposphere. — Radio Sci., 2002, vol. 37, No. 5, pp. 9-1—9-10.
- 13. Gorbunov M. E. and Lauritsen K. B.** Analysis of wave yields by Fourier integral operators and its application for radio occultations. — Radio Sci., 2004, vol. 39, No. 4, RS4010.
- 14. Gorin V. E. and Tsyrl'nikov M. D.** Estimation of multivariate observation-error statistics for AMSU-A data. — Mon. Wea. Rev., 2011, vol. 139, pp. 3765—3780.
- 15. Harris B. A. and Kelly G.** A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2002, vol. 127, pp. 1453—1468.
- 16. Lauritsen K. B., Syndergaard S., Gleisner H., et al.** Processing and validation of refractivity from GRAS radio occultation data. — Atmos. Meas. Tech., 2011, vol. 4, pp. 2065—2071.
- 17. Lazzara M. A., Dworak R., Santek D. A., et al.** High-latitude atmospheric motion vectors from composite satellite data. — J. Appl. Meteorol. and Climatology, 2014, vol. 53, No. 2, pp. 534—547.
- 18. Lewis J. M., Lakshminarayanan S., and Dhall S.** Dynamic Data Assimilation: A Least Squares Approach. — Cambridge University Press, 2006.
- 19. Rocken C., Kuo Y.-H., Schreiner W. S., et al.** COSMIC system description. — Terr., Atmos. Ocean. Sci., 2000, vol. 11, pp. 21—52.
- 20. Saunders R. W., Matricardi M., and Brunel P.** An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1999, vol. 125, pp. 1407—1425.
- 21. Verhoef A., Portabella M., and Stoffelen A.** High-resolution ASCAT scatterometer winds near the coast. — IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2012, vol. 50, No. 7, pp. 2481—2487.

Поступила в редакцию 14 II 2017 г., после доработки 31 V 2017 г.

#### THE USE OF MTVZA-GYa SATELLITE MICROWAVE RADIOMETER OBSERVATIONS IN THE DATA ASSIMILATION SYSTEM OF HYDROMETCENTER OF RUSSIA

D. R. Gaifulin, M. D. Tsyrl'nikov, A. B. Uspenskii, E. K. Kramchaninova,  
S. A. Uspenskii, P. I. Svireenko, and M. E. Gorbunov

*A brief description of the MTVZA-GYa microwave radiometer installed at the Meteor-M No. 2 Russian polar orbiting meteorological satellite is presented. The procedures of bias correction and quality control indispensable in the satellite data assimilation are considered. The operational global data assimilation system of Hydrometcenter of Russia is briefly described. The results of numerical experiments on the assimilation of MTVZA-GYa observations in six temperature-sensitive channels are given. It is demonstrated that the assimilation of these data significantly improves the accuracy of short-range weather forecasts in the Southern Hemisphere. The effect of the use of MTVZA-GYa data in the Northern Hemisphere is neutral.*