

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ ПРОФИЛЕЙ ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ

© 2020 г. В. П. Саворский<sup>a, \*</sup>, Б. Г. Кутуза<sup>b</sup>, А. Б. Аквилонова<sup>a</sup>, И. Н. Кибардина<sup>a</sup>,  
О. Ю. Панова<sup>a</sup>, М. В. Данилычев<sup>b</sup>, С. В. Широков<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

<sup>b</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Моховая, 11, стр.7, Москва, 125009 Российская Федерация

<sup>c</sup>Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,  
ул. Бутлерова, 15, Москва, 117342 Российская Федерация

\*E-mail: savor@inbox.ru

Поступила в редакцию 24.10.2019 г.

После доработки 26.11.2019 г.

Принята к публикации 17.12.2019 г.

Показано, что дополнительная, по отношению к среднеклиматическим характеристикам, априорная информация о состоянии атмосферы способна обеспечить повышение эффективности функционирования алгоритмов восстановления атмосферных профилей по данным спутниковых радиометрических СВЧ-наблюдений. Проведен поиск и дана оценка эффективности применения такой дополнительной информации для целей дистанционного зондирования. Рассмотрена возможность расширения статистического подхода путем включения в него новых видов априорной информации о температурно-влажностном состоянии атмосферы. Показано, что разработанный метод позволяет оценить эффективность применения следующих типов дополнительной априорной информации в рамках метода статистической регуляризации: 1) ковариационной матрицы полного вектора температурно-влажностных вариаций в пределах вертикального столба атмосферы, 2) ковариационной матрицы температурно-влажностных вариаций в пределах горизонтальных слоев атмосферы, 3) физических пределов на амплитуды вариаций влажности, 4) модельных среднестатистических представлений о параметрах переноса СВЧ-излучения в облачном слое.

DOI: 10.31857/S0033849420070104

### ВВЕДЕНИЕ

Восстановление вертикальных температурно-влажностных профилей атмосферы по данным спутниковых СВЧ-наблюдений является одной из классических задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1]. Вместе с тем интенсивное развитие средств ДЗЗ и современные средства доступа к данным ДЗЗ и сопутствующей информации [2] открывают новые возможности для решения данных задач. Эти возможности, в частности, позволяют интегрировать значительные информационные ресурсы, что востребовано в большинстве приложений ДЗЗ, в том числе и при восстановлении атмосферных профилей.

Априорные данные необходимы прежде всего для регуляризации решений обратных задач спутникового радиометрического СВЧ-зондирования атмосферы. Такая априорная информация

используется при восстановлении параметров атмосферы уже более 50 лет, начиная со второй половины 60-х годов [3–5]. При этом достигнуты значительные успехи в повышении точностей восстановления параметров атмосферы. Это обусловлено, в основном, существенным улучшением (за последние 10–20 лет) метрических характеристик аппаратуры и разработкой эффективных алгоритмов восстановления мультиспектральных и гиперспектральных радиометрических СВЧ-данных. Вместе с тем практически не изменились состав и структура ансамблей состояний атмосферы, статистические оценки которых используются в качестве априорной информации. Это проявляется, прежде всего, в ориентации на использование среднеклиматических зональных оценок параметров атмосферы.

Дополнительная априорная информация о состоянии атмосферы по отношению к среднеклиматическим характеристикам потенциально обеспечивает повышение эффективности функционирования алгоритмов восстановления атмосферных профилей. Цель данной работы – исследовать доступные источники такой дополнительной информации и оценить их эффективность по повышению точности и производительности алгоритмов восстановления. Для этого исследованы расширения статистического подхода [3, 4], путем включения в него новых видов априорной информации о температурно-влажностном состоянии атмосферы, а именно: 1) ковариационных матриц полного вектора температурно-влажностных вариаций в пределах вертикального столба атмосферы, 2) ковариационных матриц температурно-влажностных вариаций в пределах горизонтальных слоев атмосферы, 3) физических ограничений на пределы изменчивости абсолютной влажности, 4) среднестатистических представлений о зональных и сезонных особенностях параметров облачного слоя.

### 1. ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ АЛГОРИТМОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

Следуя подходу [6, 7], в линейном приближении искомого решения методом статистической регуляризации и в предположении, что вариации параметров атмосферы и собственные шумы СВЧ-радиометров являются гауссовскими, матрицу ошибок восстановления  $\mathbf{F}$  можно оценить как

$$\mathbf{F} = (\mathbf{J}^T \mathbf{C}_{ee}^{-1} \mathbf{J} + \mathbf{C}_{aa}^{-1})^{-1}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{C}_{aa}$  – ковариационная матрица вектора состояния атмосферы  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{C}_{ee}$  – ковариационная матрица собственных шумов СВЧ радиометрического многоканального комплекса (РМК),  $\mathbf{J}$  – якобиан радиоярких температур СВЧ РМК для вектора состояния атмосферы  $\bar{\mathbf{a}}$ ,  $T$  – знак транспонирования.

Предполагается, что  $\mathbf{C}_{ee}$  – является диагональной матрицей, т.е. каналы радиометрической СВЧ-системы полностью развязаны, якобиан  $\mathbf{J}$  определен средним значением вектора состояния  $\bar{\mathbf{a}}$  для выделенного ансамбля состояний атмосферы, на котором определена и матрица  $\mathbf{C}_{aa}$ .

#### 1.1. Оценка эффективности использования полного вектора состояния

Вектор состояния  $\bar{\mathbf{a}}$  описывает вертикальный температурно-влажностный профиль плоскостной атмосферы, т.е. включает две группы компонент:

- 1) группу, описывающую температурный профиль  $\bar{T}$ ,
- 2) группу, описывающую влажностный профиль  $\bar{q}$ .

Обе группы имеют  $K$  компонент, а вектор  $\bar{\mathbf{a}}$  имеет размерность  $2 \times K$  и может быть представлен в виде

$$\bar{\mathbf{a}} = \begin{pmatrix} \bar{T} \\ \bar{q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 \\ \dots \\ T_K \\ q_1 \\ \dots \\ q_K \end{pmatrix}, \quad (2)$$

поэтому  $\mathbf{C}_{aa}$  имеет вид

$$\mathbf{C}_{aa} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{TT} & \mathbf{C}_{Tq} \\ \mathbf{C}_{qT} & \mathbf{C}_{qq} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{C}_{TT}$ ,  $\mathbf{C}_{qq}$  – ковариационные матрицы температуры и влажности вертикального профиля атмосферы соответственно,  $\mathbf{C}_{Tq} = \mathbf{C}_{qT}^T$  – кросс-ковариационные матрицы профилей температуры и влажности.

При раздельном восстановлении профилей температуры  $\bar{T}$  и влажности  $\bar{q}$  не учитываются кросс-ковариационные связи между вариациями температуры и влажности. В этом случае  $\mathbf{C}_{Tq} = \mathbf{C}_{qT}^T = [\mathbf{0}]$ , а ковариационная матрица вектора состояния атмосферы может быть представлена в виде

$$\mathbf{C}'_{aa} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{TT} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{qq} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Подставив в выражение (1) матрицу  $\mathbf{C}'_{aa}$  вместо  $\mathbf{C}_{aa}$ , можно определить эффективность использования полного вектора состояния, учитывающего кросс-ковариационные связи между вариациями температуры и влажности, по сравнению с последовательным восстановлением профилей температуры и влажности без учета их взаимозависимости

$$\mathbf{F}' = (\mathbf{J}^T \mathbf{C}_{ee}^{-1} \mathbf{J} + \mathbf{C}'_{aa})^{-1}. \quad (5)$$

Мерой эффективности использования полного вектора состояния служат отношения априорной среднеквадратической величины вариаций параметров состояния  $\sigma_k^{\text{pri}} = \sqrt{C_{kk}}$ ,  $k = 1, 2 \times K^1$  к апостериорной  $\sigma_k^{\text{post}} = \sqrt{F_{kk}}$  среднеквадратиче-

<sup>1</sup> Здесь и далее по тексту индекс  $k$  изменяется в диапазоне от 1 до  $2 \times K$ .

ской точности восстановления, оцененной по формуле (1):

$$E_k = \sigma_k^{\text{pri}} / \sigma_k^{\text{post}}. \quad (6)$$

Важным показателем эффективности применения полного вектора состояния является также отношение апостериорной точности восстановления  $\sigma_k^{\text{post}}$  к  $\sigma_k^{\text{pri}} = \sqrt{F_{kk}^{\text{pri}}}$ :

$$G_k = \sigma_k^{\text{post}} / \sigma_k^{\text{pri}}. \quad (7)$$

Показатель  $G_k$  характеризует эффективность восстановления с использованием полного вектора состояния по сравнению с использованием алгоритмов раздельного восстановления профилей температуры и влажности.

### 1.2. Оценка эффективности учета горизонтальной связности параметров атмосферы

Одними из возможных источников априорной информации, наряду со среднеклиматическими статистиками, являются непосредственно измеренные температурно-влажностные профили или их фрагменты. Такой информацией являются атмосферные профили, полученные с использованием радиозондов, а также данные контактных наземных измерений. При использовании этих априорных данных для восстановления необходимо учитывать взаимную корреляцию  $\mathbf{R}(\bar{r})$  атмосферных профилей вдоль земной поверхности. Оценки этих корреляционных зависимостей определяются пространственно-временными масштабами атмосферных флуктуаций [8]. Учет горизонтальной связности профилей в первом приближении связан с модификацией ковариационной матрицы  $\mathbf{C}_{aa}$ . При использовании выражения (1) ее необходимо заменить на матрицу  $\mathbf{C}_{aa}^h$ :

$$\mathbf{C}_{aa}^h = \mathbf{H}\mathbf{C}_{aa}. \quad (8)$$

Здесь  $\mathbf{H}$  – диагональная матрица, отображающая уменьшение уровня априорных оценок атмосферных параметров при учете контактных измерений. Предполагая, что в пределах радиусов горизонтальной корреляции  $\Delta r_k$  точность определения параметров атмосферы задается точностью контактных измерений  $M_{kk}$ , относительное улучшение точности априорных данных при можно оценить  $\Delta L / \Delta r_k \gg k$  (с точностью до коэффици-

ента порядка 1, определяемого видом корреляционных зависимостей) следующим образом:

$$H_{kk} \cong \frac{C_{kk}(\Delta L^2 - \Delta r_k^2) + M_{kk}\Delta r_k^2}{C_{kk}\Delta L^2} = 1 - \frac{1}{\xi_k^2} \left( 1 - \frac{M_{kk}}{C_{kk}} \right). \quad (9)$$

Здесь  $\xi_k = \Delta L / \Delta r_k$ ,  $H_{kk}$  – элементы диагональной матрицы  $\mathbf{H}$ ,  $M_{kk}$  – элементы диагональной матрицы, задающей точности контактных измерений,  $\Delta L$  – горизонтальное пространственное разрешение радиометрической СВЧ-системы,  $\Delta r_k$  – радиус корреляции  $k$ -го компонента вектора состояния атмосферы. С учетом того, что  $M_{kk}/C_{kk} \gg 1$ , выражение (4) может быть существенно упрощено при  $\xi_k \gg 1$ :

$$H_{kk}(\xi) = 1 - \frac{1}{\xi_k^2}. \quad (10)$$

Следует отметить, что уже при  $M_{kk}/C_{kk} = 1$  оценка (10) отличается от оценки (9) на 2.5%.

Для оценки относительной эффективности учета горизонтальных связей применим отношение, характеризующее повышение точности восстановления при добавлении дополнительной априорной информации о горизонтальных статистических зависимостях атмосферных профилей:

$$G_k^h = \frac{\sigma_k^{\text{post}}}{\sigma_k^h}, \quad (11)$$

где  $\sigma_k^h = \sqrt{F_{kk}^h}$ , а  $F_{kk}^h$  – диагональные элементы матрицы ошибок восстановления

$$\mathbf{F}^h = (\mathbf{J}^T \mathbf{C}_{ee}^{-1} \mathbf{J} + (\mathbf{H}\mathbf{C}_{aa})^{-1})^{-1}. \quad (12)$$

### 1.3. Оценка эффективности учета физических ограничений

Эффективность учета физических ограничений исследуем для профилей влажности, поскольку диапазон изменчивости параметров влагосодержания ограничен положительными значениями абсолютной влажности, существенно не превышающими порога насыщения. Для оценки эффективности учета физических ограничений воспользуемся тем фактом, что при приближении среднего значения случайной величины к границе, амплитуда ее вариаций, а следовательно, и ее дисперсия, заметно уменьшаются. Поэтому оценка влияния учета ограничений на точность восстановления может быть в первом приближении оценена путем введения дополнительной коррекции (уменьшения) амплитуды вариаций восстанавливаемой случайной величины. В нашем случае это может быть описано введением корректирующей

**Таблица 1.** Основные характеристики облаков

Формы облаков и их параметры	Слоистые (St), слоисто-кучевые (Sc)		Высоко-кучевые (Ac)	Высоко-слоистые (As)	Кучевые		
	лето	зима			плоские (Cu hum)	средние (Cu med)	мощные (Cu cong)
$H_{н.г.}$ , км	1.1	0.71	3.5	4.0	1.1	1.1	1.1
$\Delta H$ , км	0.32	0.35	0.3	1.0	1.0	2.0	4.5
$T_{н.г.}$ , °C	0	-8.6	-7.8	-10.9	8	8	8
$W$ , кг/м <sup>2</sup>	0.10	0.08	0.06	0.3	0.15	0.52	4.7
$l$ , км	10...1000	10...1000	10...1000	10...1000	<1	1...5	2...10

$H_{н.г.}$  – высота нижней границы облаков;  $\Delta H$  – толщина облаков;  $T_{н.г.}$  – температура на нижней границе облаков;  $W$  – водо-запас облаков;  $l$  – горизонтальная протяженность облаков.

щих коэффициентов, уменьшающих априорные значения вариаций влажности в заданном диапазоне высот. В этом случае матрица  $C_{aa}$  в выражении (1) должна быть заменена на матрицу  $C_{aa}^v$ :

$$C_{aa}^v = VC_{aa}, \tag{13}$$

где  $V$  – диагональная матрица с элементами

$$v_{kk} = \begin{cases} 1, & k = \overline{1, k_1} \\ p_k < 1, & k = \overline{k_1 + 1, K + k_2} \\ 1, & k = \overline{K + k_2, 2 \times K} \end{cases} \tag{14}$$

Здесь  $p_k < 1$  – коэффициент снижения уровня вариаций влажности в  $k$ -слое атмосферы,  $k_1$  и  $k_2$  – номера соответственно нижнего и верхнего слоев атмосферы, в которых снижены вариации влаго-содержания.

Для оценки эффективности учета физических ограничений применим соотношение, аналогичное (11):

$$G_k^v = \frac{\sigma_k^{post}}{\sigma_k^v}, \tag{15}$$

где  $\sigma_k^v = \sqrt{F_{kk}^v}$ , а  $F_{kk}^v$  – диагональные элементы матрицы ошибок восстановления

$$F^v = (J^T C_{ee}^{-1} J + (VC_{aa})^{-1})^{-1}. \tag{16}$$

#### 1.4. Модели облачной атмосферы

Существенное влияние на оценки эффективности применения СВЧ-радиофизических методов для определения температурно-влажностных характеристик атмосферы оказывает облачный покров. Описание наиболее распространенных видов облаков и их статистические характеристики приведены в [9–20]. Для учета влияния облачного покрова важно иметь модельные характеристики облаков, опирающиеся на результаты, хранимые в

базах данных многолетних наблюдений. Наиболее крупными из них в настоящее время являются EECRA<sup>2</sup>, пополняемая с 1952 г., и ISCCP<sup>3</sup>, формируемая с 1983 г. на основе результатов космической съемки группировкой геостационарных и полярно-орбитальных спутников NOAA, GOES, Meteosat и GMS.

Облака классифицируются по высотам, на которых они образуются, по фазовому строению, по внешнему виду и по происхождению<sup>4</sup> (см. также [19, 20]).

Для оценки влияния облачности на характеристики радиоизлучения системы “атмосфера–подстилающая поверхность” в работе [21] на основе статистических данных о физических параметрах слоистообразных и кучевых облаков, характерных для умеренных широт Европейской территории России [9, 11–15, 18, 21–24], были построены модели облаков (табл. 1). Эти статистические описания были применены нами в данной работе для оценки эффективности использования СВЧ радиоспектрометров при восстановлении температурно-влажностных профилей атмосферы.

При расчетах яркостных температур в [21] предполагалось, что облака являются коллоидально-устойчивыми, т.е. без осадков. В этом случае долей рассеянного излучения в рассматриваемом диапазоне длин волн (частот) можно пренебречь [25]. Влияние неоднородности заполнения поля зрения антенны облаками не рассматривалось.

<sup>2</sup> EECRA. Extended Edited Synoptic Cloud Reports Archive. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/extended-edited-synoptic-cloud-reports-archive-eecra-ships-and-land-stations-over-globe>.

<sup>3</sup> ISCCP. The International Satellite Cloud Climatology Project. <https://isccp.giss.nasa.gov/>.

<sup>4</sup> International Cloud Atlas. World Meteorological Organization. 2018. <https://cloudatlas.wmo.int/clouds.html>.

**Таблица 2.** Средние и максимальные значения яркостных температур  $T_{я}$ (ср/макс), облаков различных форм по результатам измерений

$\lambda$ , см	$T_{я}$ , К	Кучевые		Слоистые, слоисто-кучевые (St, Sc)	
		Cu med	Cu cong		
		$T_{н.г.}$ , °С			
		0...5		-10 (зима)	5 (лето)
0.41	Ср/макс	50/140	90/160	20/35	35/70
0.82	Ср/макс	30/120	70/160	12/20	15/35
1.6	Ср/макс	10/40	25/67	4/7	5/11
3.3	Ср/макс	2.5/11	7/20	0.9/1.5	1/2.5

Согласно [21], в рассматриваемом диапазоне частот наиболее заметное влияние на характеристики излучения оказывают облака вертикального развития, особенно мощные кучевые облака. Для этих облаков изменения  $\Delta T_{я}(\lambda)$  для случая наблюдений над гладкой водной поверхностью могут достигать 40...110 К. Для слоистообразных облаков ожидаемые приращения  $\Delta T_{я}(\lambda)$  могут изменяться от 2...30 К, в зависимости от длины волны, формы облаков, времени года. Такие большие вариации  $\Delta T_{я}(\lambda)$  обусловлены широким диапазоном изменений следующих физических характеристик облаков: температура и мощность облачного слоя, его водозапас.

Наземные измерения характеристик излучения облачной атмосферы, выполненные в свое время в [26], наглядно показали влияние облачности на яркостные температуры. В табл. 2 приведены средние и максимальные значения  $T_{я}(\lambda)$  облаков. Видно, что с уменьшением длины волны СВЧ-излучения  $T_{я}(\lambda)$  облаков всех форм возрастает.

### 1.5. Оценка эффективности учета параметров облачного покрова

Для расчета эффективности учета модельных параметров облачного слоя были использованы модификации формулы (1):

$$F_1 = \left( J_1^T C_{ee}^{-1} J_1 + C_{aa}^{-1} \right)^{-1}, \quad (17)$$

$$F_2 = \left( J_2^T C_{ee}^{-1} J_2 + C_{aa}^{-1} \right)^{-1}, \quad (18)$$

где  $J_1$  — якобиан радиояркостных температур, регистрируемых РМК, для вектора состояния облачной атмосферы  $\vec{a}$ , при расчете которого не учтено наличие облачного слоя, т.е. при водозапасе облаков  $W = 0$ , а  $J_2$  — якобиан радиояркостных температур, регистрируемых РМК, для вектора состояния облачной атмосферы  $\vec{a}$  при наличии облачного слоя с  $W > 0$ .

Для оценки эффективности учета наличия облачного слоя используем соотношение, аналогичное выражению (7):

$$H_k = \frac{\sigma_{1k}}{\sigma_{2k}}. \quad (19)$$

## 2. ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ РЕГУЛЯРИЗАТОРОВ

Проверка эффективности применения дополнительных регуляризаторов выполнена на специализированном стенде системы восстановления атмосферных профилей. Для тестирования использованы показатели функционирования программного обеспечения восстановления атмосферных профилей по модельному спектру восходящего СВЧ-излучения системы “атмосфера—подстилающая поверхность”. Моделирование проведено с использованием программного пакета ARTS [27–29]. При моделировании оценивались сплошные спектры СВЧ-излучения в диапазоне 10...200 ГГц системы “атмосфера—подстилающая поверхность” в диапазоне коэффициентов отражения 0.5...0.1. Флуктуационная чувствительность радиометрических СВЧ-приемников  $\phi$  была принята постоянной, во всем 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 SeeBor<sup>5</sup> [30]. Показатели эффективности применения априорной информации, приведенные на рис. 1–4, получены, в частности, на подмножестве данных SeeBor, в котором содержатся результаты радиозондирования, выполненные в августе в зоне 30°...60° с.ш.

<sup>5</sup> SeeBor V5.1 Training data set. [http://cimss.ssec.wisc.edu/training\\_data/data/SeeBorV5.1\\_Training\\_data\\_Emis10inf2004.bin](http://cimss.ssec.wisc.edu/training_data/data/SeeBorV5.1_Training_data_Emis10inf2004.bin).

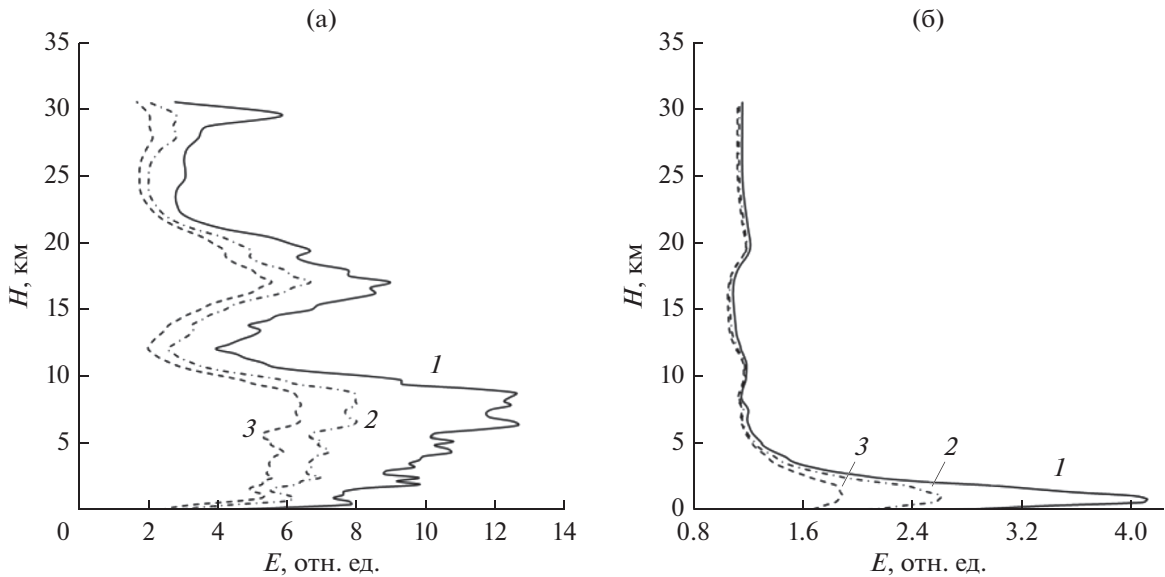


Рис. 1. Профиль эффективности применения полного вектора состояния для восстановления температуры (а) и влажности (б) при  $\varphi = 0.1$  (1), 0.5 (2) и 1.0 К (3).

На рис. 1 приведены результаты расчета эффективности применения полного вектора состояния атмосферы. Они подтверждают высокую эффективность такого подхода к восстановлению температурных профилей в тропосфере даже при чувствительности СВЧ-радиометров  $\varphi = 1.0$  К. Для влажностных профилей эффективность существенно ниже. Однако, и в этом случае при использовании радиометров с  $\varphi < 0.5$  К в приземном слое атмосферы до высот менее 3 км, эффективность применения полного вектора достаточно высока.

Эффективность  $G$  восстановления температуры по полному вектору состояния атмосферы, по сравнению с использованием только априорных данных о ковариационной матрице температур, практически не отличается от единицы во всем диапазоне высот, т.е. применение полного вектора в этом случае не эффективно. Напротив, при восстановлении профилей влажности, использование полного вектора эффективно. Это подтверждается приведенными на рис. 2 данными, показывающими 10%-ное увеличение относительной эффективности восстановления при использовании полного вектора состояния.

Оценки эффективности учета горизонтальной связности параметров атмосферы были проведены для значений  $\zeta = 2...7$  и  $0.1...1.0$  К. Результаты оценок, полученные для постоянных во всем диапазоне частот, высот и значений  $\zeta_k = \zeta$ , представлены на рис. 3. Эти результаты показывают, что учет данной априорной информации целесообразен при  $\zeta = 2...3$  и уже практически неэффективен при  $\zeta > 5$ . Учитывая, что при безоблачных условиях радиусы корреляции параметров атмосферы

$\Delta r_k$  лежат в интервале 3...5 км [8], можно прийти к выводу, что использование априорной информации о горизонтальных размерах атмосферных возмущений эффективно для повышения точности восстановления параметров атмосферы по СВЧ радиометрическим данным в том случае, когда пространственное разрешение этих систем наблюдения на зондируемом объекте не превышает 15 км.

Результаты оценок эффективности учета физических ограничений на диапазоны изменчивости параметров состояния атмосферы представлены на рис. 4. В данном случае, в соответствии с методикой, изложенной в п. 1.3, были проведены

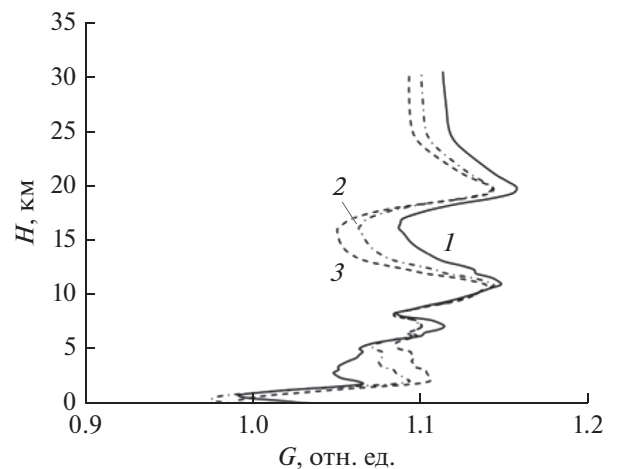


Рис. 2. Профиль эффективности применения полного вектора состояния для восстановления влажности по сравнению с раздельным восстановлением влажности при  $\varphi = 0.1$  (1), 0.5 (2) и 1.0 К (3).

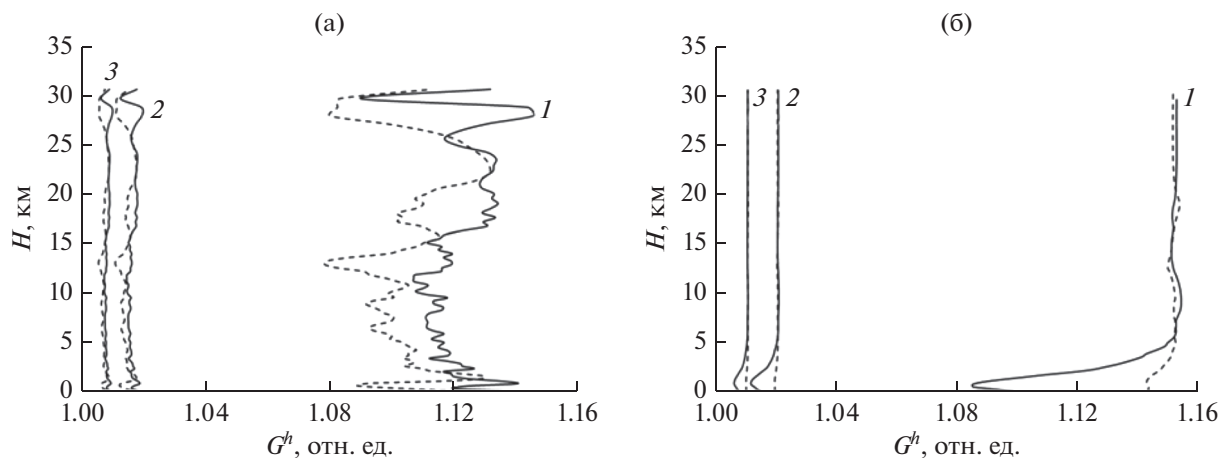


Рис. 3. Профиль относительной эффективности восстановления температуры (а) и влажности (б) при учете горизонтальной связности параметров атмосферы при  $\varphi = 0.1$  (сплошные) и 1.0 К (штриховые);  $\zeta = 2$  (1), 5 (2) и 7 (3).

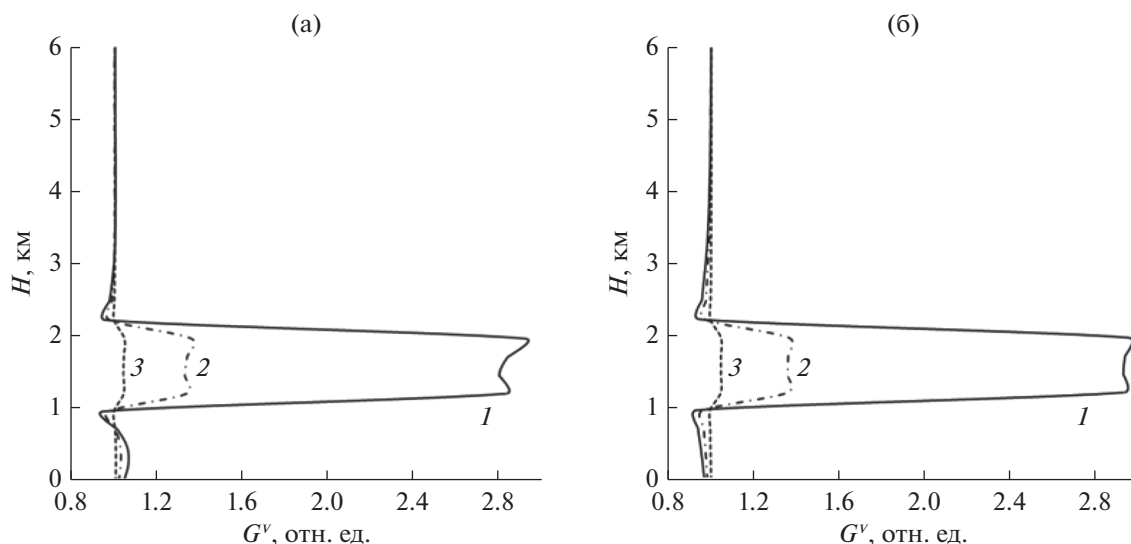


Рис. 4. Профиль относительной эффективности восстановления влажности при учете снижения амплитуды вариаций влажности на высотах 1...2 км при  $\varphi = 0.1$  (а) и 1.0 К (б);  $p = 0.1$  (1), 0.5 (2) и 0.9 (3).

косвенные приближенные оценки эффективности учета физических ограничений, принимая во внимание уменьшение диапазонов изменчивости случайных величин при приближении их средних к границам допустимых значений. Модельным атмосферным параметром с ограничениями была выбрана влажность воздуха, абсолютные значения которой на каждой из высот атмосферы ограничены снизу (положительными значениями параметра) и сверху (значениями, соответствующими давлениям насыщения водяных паров). При проведении оценок был выбран диапазон высот, на котором средние значения парциальных давлений водяных паров близки к насыщающим, а именно высоты диапазона 1...2 км. При моделировании были оценены значения эффективного

уменьшения дисперсии естественных вариаций влажности в интервале  $p_k = p$  от 0.1 до 0.9. Из результатов, представленных на рис. 4, видно, что эффективного улучшения точности восстановления вне диапазона, в котором было задано снижение флуктуаций, не происходит. В то же время в том интервале высот, где было задано снижение вариаций влажности, относительные точности восстановления были значительно улучшены. Так, при  $\varphi = 1.0$  К и  $p = 0.5$  относительная эффективность  $G^v$  в интервале высот 1...2 км составила 1.4, при этом следует отметить слабую зависимость  $G^v$  от  $\varphi$ .

Априорные данные для оценки ковариационных матриц в формулах (17) и (18) были получены

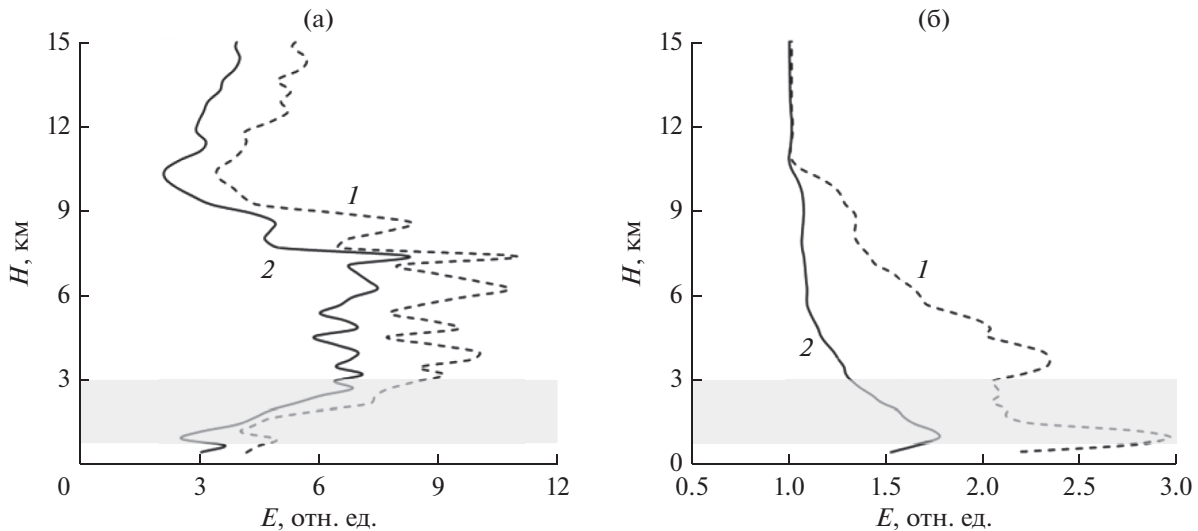


Рис. 5. Профиль эффективности для температуры (а) и влажности (б) при наличии облачного слоя на высотах от 1.2 до 3.2 км при  $\varphi = 0.1$  (1) и 1.0 К (2), серым цветом отмечено расположение облачного слоя.

в результате статистического анализа радиозондовых дневных (12:00 УМТ) измерений параметров атмосферы в облачных условиях августа месяца. В набор анализируемых данных включены атмосферные профили, измеренные в период с 1973 по 2018 гг. на станции Долгопрудный<sup>6</sup>. В качестве типового облачного слоя, для летних дневных условий, нами были промоделированы профили водности кучевых облаков с нижней кромкой на высоте 1 км, мощностью 1...2 км и максимальной водностью от 0 (безоблачные условия) до 3.0 г/м<sup>3</sup>.

Результаты оценок (в соответствии с соотношениями (17)–(19)) эффективности применения модельной априорной информации о наличии облачного слоя представлены на рис. 5 для профилей температуры (а) и влажности (б). На рис. 5 представлены результаты 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 кг/м<sup>3</sup>. Из рис. 5 следует, что учет модельных представлений об облачном слое существенно повышает эффективность использования априорной информации как для температуры, так и для влажности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе развит метод оценки эффективности улучшения алгоритма восстановления параметров атмосферы за счет привлечения дополнительных источников априорной информации, таких как:

- ковариационная матрица полного вектора изменения температуры и влажности атмосферы вертикального профиля атмосферы;
- ковариационная матрица изменения вариаций параметров атмосферы вдоль горизонтального слоя атмосферы;
- физические пределы изменения профиля влажности;
- модельные среднестатистические представления о параметрах переноса СВЧ излучения в облачном слое.

Разработанный метод применим к обработке спутниковых СВЧ радиометрических данных с привлечением статистических данных о параметрах атмосферы, включающих, наряду с ковариационной матрицей вариаций температуры и влажности в разных слоях атмосферы, также и ковариационные соотношения вариаций вдоль каждого из слоев, т.е. в горизонтальном направлении.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках госзадания по теме 0030-2019-0008 “Космос”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутуза Б.Г., Данильчев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2016.
2. Луян Е.А., Саворский В.П., Шокин Ю.И. и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 21.

<sup>6</sup> Wyoming Weather Web. Upperair Air Data. Soundings. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.



3. *Strand O.N., Westwater B.R.* // *Associat. Comput. Machin.* 1968. V. 15. P. 100.
4. *Турчин В.Ф., Козлов В.П., Малкевич М.С.* // *Успехи физ. наук.* 1970. № 102. С. 345.
5. *Горчакова И.А., Малкевич М.С., Турчин В.Ф.* // *Изв. АН СССР. Сер. Физика атм. и океана.* 1970. № 6. С. 565.
6. *Rodgers C.D.* *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice.* Singapore: World Scientific, 2000.
7. *Lipton A.E.* // *IEEE Trans.* 2003. V. TGRS-41. № 4. P. 761.
8. *Kutuzov B.G.* // *Radio Sci.* 2003. V. 38. № 3. P. 12-1.
9. *Боровиков А.М., Гайворонский И.И., Зак Е.Г. и др.* *Физика облаков.* Л.: Гидрометеоздат, 1961.
10. *Хргиан А.Х.* *Физика атмосферы.* Л.: Гидрометеоздат, 1969.
11. *Скацкий В.И.* // *Труды Инст. прикл. геофизики.* 1969. № 13. С. 43.
12. *Фейгельсон Е.М.* *Лучистый теплообмен и облака.* Л.: Гидрометеоздат, 1970.
13. *Шметер С.М.* *Физика конвективных облаков.* Л.: Гидрометеоздат, 1972.
14. *Девятова В.А.* // *Метеорология и гидрология.* 1973. № 8. С. 26.
15. *Девятова В.А.* // *Труды ГМЦ СССР.* 1974. № 148. С. 73.
16. *Бобылев Л.П., Васищева М.А., Образцов С.П. и др.* // *Труды ГГО. Экспериментальная геофизика.* 1975. № 328. С. 22.
17. *Васищева М.А., Шукин Г.Г.* *Экспериментальные исследования водности облаков. Статистические модели атмосферы.* Серия Метеорология. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1976.
18. *Дубровина Л.С.* *Облака и осадки по данным самолетного зондирования.* Л.: Гидрометеоздат, 1982.
19. *Мазин И.П., Хргиан А.Х.* *Облака и облачная атмосфера.* Справочник. Л.: Гидрометеоздат, 1989.
20. *Атлас облаков / Сост. Д.П. Беспалов, А.М. Девяткин, Ю.А. Довгалюк и др.* СПб.: ГГО, 2011.
21. *Аквилонова А.Б., Кутуза Б.Г.* // *РЭ.* 1978. Т. 23. № 9. С. 1792.
22. *Войт Ф.Я., Мазин И.П.* // *Изв. АН СССР. Сер. Физика атм. и океана.* 1972. Т. 8. № 11. С. 1166.
23. *Дубровина Л.С.* // *Труды ВНИИГМИ-МЦД.* 1974. № 7. С. 3.
24. *Копрова Л.И., Болдырев В.Г.* // *Изв. АН СССР. Сер. Физика атм. и океана.* 1970. Т. 6. № 2. С. 154.
25. *Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.* *Радиоизлучение Земли как планеты.* М.: Наука, 1974.
26. *Башаринов А.Е., Кутуза Б.Г.* // *Труды ГГО им. А.И. Воейкова.* 1968. Вып. 222. С. 100.
27. *Buehler S.A., Eriksson P., Kuhn T. et al.* // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 2005. V. 91. № 1. P. 65.
28. *Eriksson P., Buehler S.A., Davis C.P. et al.* // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 2011. V. 112. № 10. P. 1551.
29. *ARTS User Guide / Eds. by Ericsson P., Buehler S., 2017.* [https://www.radiativetransfer.org/misc/arts-doc/uguide/arts\\_user.pdf](https://www.radiativetransfer.org/misc/arts-doc/uguide/arts_user.pdf).
30. *Borbas E.E., Seemann S.W., Huang H.L. et al.* // *Proc. XIV Int. ATOVS Study Conf. Beijing, China, 25–31, May 2005.* Madison: Univ. Wisconsin-Madison, 2005. P. 763.