

Эффективность восстановления температурно-влажностных профилей облачной атмосферы по данным спутниковых СВЧ-спектрометров

В.П.Саворский, А.Б.Аквилонова, И.Н.Кибардина, Б.Г.Кутуза, О.О.Кузнецов, О.Ю.Панова

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Россия, Московская обл., Фрязино, 141190, пл. Введенского, 1, savor@inbox.ru

В работе развита методика оценки эффективности применения дополнительной априорной информации, а именно ковариационной матрицы вариаций полного вектора температурно-влажностного состояния атмосферы и модельных представлений поглощения СВЧ излучения в облачном слое, к восстановлению температурно-влажностных профилей атмосферы методом статистической регуляризации. Проверка применимости развитого подхода проведена с использованием априорных статистических оценок ковариационных матриц вертикальных профилей температуры и влажности, которые были получены в рамках проведенного в работе статистического анализа ансамбля данных многолетнего радиозондирования атмосферы.

The paper developed a method for evaluating the effectiveness of using additional a priori information, namely, the covariance matrix of variations of the total vector of the temperature-humidity state of the atmosphere and model representations of microwave absorption in a cloud layer. The developed method of evaluating the effectiveness is applied to the use of satellite microwave radio spectrometers to restore temperature and humidity profiles by the method of statistical regularization. The test of the applicability of the developed approach was successfully conducted on a priori statistical estimates of the covariance matrix in the vertical profiles of temperature and humidity, which were obtained as a result of the statistical analysis of an ensemble of data from the multiyear atmospheric radiosonde measurements.

Введение

Использование спутниковых СВЧ наблюдений для восстановления температурно-влажностных характеристик атмосферы является одной из классических задач дистанционного зондирования Земли [1] со спутниковых платформ. При этом, не смотря на более чем полувековое развитие данного подхода, интенсивное развитие средств ДЗЗ и современные средства доступа к массивам данных ДЗЗ и сопутствующей информации [2] открывают новые возможности для решения такого рода задач. Эти возможности, в частности, позволяют интегрировать значительные информационные ресурсы, в том числе и различного рода априорные данные, что востребовано в значительном числе приложений ДЗЗ.

Априорные данные необходимы и для регуляризации решений обратных задач спутникового СВЧ радиометрического зондирования атмосферы. Такая априорная информация используется при восстановлении параметров атмосферы, начиная с работ [3-5]. При этом достигнуты значительные успехи в повышении точностей восстановления параметров атмосферы. Это обусловлено, прежде всего, существенным улучшением (за последние 10-20 лет) метрических характеристик аппаратуры и разработкой эффективных алгоритмов восстановления мультиспектральных и гиперспектральных СВЧ радиометрических 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 безоблачной атмосферы.

Дополнительная по отношению к среднеклиматическим характеристикам априорная информация о состоянии атмосферы потенциально обеспечивает повышение эффективности функционирования алгоритмов восстановления атмосферных профилей. Поэтому в работе поставлена цель исследовать доступные источники такой дополнительной информации и оценить их эффективность по повышению точности и производительности алгоритмов восстановления. Для достижения поставленной цели в работе исследованы расширения статистического подхода [3,4] путем включения в него новых видов априорной информации о температурно-влажностном состоянии атмосферы.

Предварительный анализ проблемы позволил установить, что наряду с ковариационными матрицами вариаций вертикальных профилей температуры и влажности необходимо оценить эффективность использования следующих видов априорной информации: 1) ковариационной матрицы вариаций полного вектора температурно-влажностного состояния атмосферы, 2) модельные представления о параметрах облачного слоя.

1. Постановка задачи

Следуя подходу [6,7], матрицу ошибок восстановления \mathbf{F} можно оценить, используя следующее соотношение

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

где \mathbf{C}_{aa} - ковариационная матрица вектора состояния атмосферы \vec{a} , \mathbf{C}_{ee} - ковариационная матрица собственных шумов СВЧ радиометрического многоканального комплекса, \mathbf{J} - якобиан радиояркостных температур СВЧ радиометрического многоканального комплекса для вектора состояния безоблачной атмосферы \vec{a} , T - знак транспонирования.

Такой подход требует для регуляризации решения минимума априорной информации по сравнению с прочими методами статистической регуляризации, базирующимися на априорных данных. Наряду с этим предполагается, что \mathbf{C}_{ee} является диагональной матрицей, т.е. каналы СВЧ радиометрической системы полностью развязаны, а якобиан \mathbf{J} детерминирован средним значением (математическим ожиданием) вектора состояния \vec{a} по выделенному ансамблю состояний атмосферы, на котором определена и матрица \mathbf{C}_{aa} .

В качестве меры эффективности использования априорных значений вектора состояния в работе приняты отношения априорной среднеквадратической величины вариаций параметров состояния $\sigma_k^{pri} = \sqrt{C_{kk}}$, $k = \overline{1, 2 \times K}$ каждого из K слоев атмосферы к апостериорной среднеквадратической точности восстановления $\sigma_k^{post} = \sqrt{F_{kk}}$, $k = \overline{1, 2 \times K}$, оцененной по (1):

$$E_k = \frac{\sigma_k^{pri}}{\sigma_k^{post}}, k = \overline{1, 2 \times K}, \quad (2)$$

1.1. Оценка эффективности использования полного вектора состояния

Вектор состояния \vec{a} описывает вертикальный температурно-влажностный профиль плоско-слоистой атмосферы, т.е. включает 2 группы компонент: группу, описывающую температурный профиль \vec{T} , и группу, описывающую влажностный профиль \vec{q} . Обе группы состоят из K компонент, а вектор \vec{a} имеет $2 \times K$ компонент и может быть представлен в следующем виде:

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} \vec{T} \\ \vec{q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 \\ \dots \\ T_K \\ q_1 \\ \dots \\ q_K \end{pmatrix}$$

Поэтому C_{aa} может быть представлена в виде

$$C_{aa} = \begin{bmatrix} C_{TT} & C_{Tq} \\ C_{qT} & C_{qq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

где C_{TT} , C_{qq} – ковариационные матрицы температур и влажности вертикального профиля атмосферы, соответственно, $C_{qT} = C_{qT}^T$ – кросс-ковариационные матрицы профилей температуры и влажности.

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

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

Подставив в выражение (1) матрицу C'_{aa} , оцененную по формуле (4), вместо C_{aa} , оцененную по (3), мы имеем возможность 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

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

Важным показателем эффективности применения полного вектора состояния является также отношение апостериорной точности восстановления σ_k^{post} к $\sigma'_k = \sqrt{F'_{kk}}$, $k = \overline{1, 2 \times K}$:

$$G_k = \frac{\sigma_k^{post}}{\sigma'_k}, k = \overline{1, 2 \times K}. \quad (6)$$

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

1.2. 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 [8-20]. Для учета влияния облачного покрова важно иметь модельные характеристики облаков, основывающиеся на результатах, хранимых в базах данных многолетних наблюдений, наиболее крупными из которых в настоящее время являются EECRA [21], пополняемая с 1952 г., и ISCCP [22], формируемая на основе результатов космической съемки группировкой геостационарных и полярно-орбитальных спутников NOAA, GOES, Meteosat и GMS, начиная с 1983 г.

Облака классифицируются по высотам, на которых они образуются, по фазовому строению, по внешнему виду и по происхождению [18-20]. По высоте основания различают облака нижнего яруса (ниже 2 км), среднего яруса (2÷6 км) и верхнего яруса (выше 6 км). Особо выделяют облака вертикального развития с основанием на

уровне нижнего яруса и высокой вершиной (до 8÷12 км и более). По фазовому строению различают облака: водяные (капельные), ледяные, или кристаллические, и смешенного строения. По форме облака бывают слоистые и кучевые.

Для оценки влияния облачности на характеристики радиоизлучения системы «атмосфера-подстилающая поверхность» в работе [23] на основе статистических данных о физических параметрах слоистообразных и кучевых облаков, характерных для умеренных широт Европейской территории России, были построены модели облаков, приведенные табл. 1. Для этого были использованы статистические параметры слоистообразных и кучевых облаков, наблюдаемых в умеренных широтах Европейской части России [8,10-14,17,23-26]. Эти статистические описания были применены нами в данной работе для оценки эффективности использования СВЧ радиоспектрометров при восстановлении температурно-влажностных профилей атмосферы.

Таблица 1 - Основные характеристики облаков

Форма облаков	St, Sc ¹	St, Sc ²	Ac	As	Cu hum	Cu med	Cu cong
Высота нижней границы, $H_{н.г.}$, км	1.1	0.71	3.5	4.0	1.1	1.1	1.1
Мощность l , км	0.32	0.35	0.3	1.0	1.0	2.0	4.5
Температура на нижней границе, $T_{н.г.}$, °C	0	-8.6	-7.8	-10.9	8	8	8
Водозапас W , кг/м ²	0.10	0.08	0.06	0.3	0.15	0.52	4.7
Горизонтальная протяженность, км	10÷100 0	10÷100 0	10÷100 0	10÷100 0	<1	1-5	2-10

В рассматриваемом диапазоне частот наблюдается заметное влияние облаков, при этом облака вертикального развития, особенно мощные кучевые облака, вызывают значительно большие приращения яркостных температур, чем слоистообразные облака. Для последних ожидаемые приращения $\Delta T_{я}(v)$ могут изменяться от 2 до 30 К в зависимости от длины волны и формы облаков, времени года. Для кучевых облаков эти изменения могут достигать 40÷110 К. Такие большие вариации $\Delta T_{я}(v)$ обусловлены широким диапазоном изменений ряда физических характеристик облаков таких, как температура и мощность облачного слоя, его водозапас. На частотах $\nu \leq 15$ ГГц (на волнах $\lambda \geq 2$ см) заметный вклад в яркостную температуру дают лишь развитые кучевые облака, так, на частоте $\nu = 10$ ГГц (волна 3 см) для облаков Cu cong расчетное значение $\Delta T_{я}(v)$ составило примерно 42 К. Некоторое уменьшение приращений яркостных температур на частотах > 80 ГГц (на волнах короче 3,7 мм) для развитых кучевых облаков обусловлено тем, что в спектре $T_{я}(v)$ при больших поглощениях наступает «насыщение», в то время как для безоблачной атмосферы яркостная температура продолжает расти с ростом частоты (уменьшением длины волны).

Важнейшей из микрофизических характеристик облаков является водность $w(h)$. В облаках типа St, Sc толщиной до 600÷700 м с увеличением высоты над основанием

¹ Теплое полугодие

² Холодное полугодие

облачного слоя водность $w(h)$ возрастает и достигает максимума в верхней части облака. Затем быстро убывает к верхней границе [23].

Распределение водности кучевых облаков описывается функцией вида [23]

$$\eta(\xi) = \frac{\xi^m(1-\xi)^n}{\xi_0^m(1-\xi_0)^n}; \quad \eta = \frac{w}{w_{max}}, \quad (7)$$

где $\xi = \frac{h}{\Delta h}$; h – высота над основанием облака; Δh – толщина облака; w_{max} – максимальное значение водности, которое достигается при $\xi = \xi_0$;

$$m = \frac{\lg 2}{\lg \frac{\xi_0}{\xi_1} + \frac{1-\xi_0}{\xi_0} \lg \frac{1-\xi_0}{1-\xi_1}}, \quad (8)$$

$$n = \frac{1-\xi_0}{\xi_0} m, \quad (9)$$

ξ_1 – точка, в которой $\eta(\xi) = 1/2$. Согласно [26] относительный уровень максимальной водности $\xi \approx 0,8$. $\xi_1 = 0,55$. Для наших расчетов было принято: $m = 3,27$; $n = \overline{1,67}$.

1.3. Оценка эффективности учета параметров облачного покрова

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

$$\mathbf{F}_1 = (\mathbf{J}_1^T \mathbf{C}_{ee}^{-1} \mathbf{J}_1 + \mathbf{C}_{aa}^{-1})^{-1}, \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_2 = (\mathbf{J}_2^T \mathbf{C}_{ee}^{-1} \mathbf{J}_2 + \mathbf{C}_{aa}^{-1})^{-1}, \quad (11)$$

где \mathbf{J}_1 – якобиан радиоярких температур СВЧ радиометрического многоканального комплекса для вектора состояния облачной атмосферы \vec{a} , при расчете которого не учтено наличие облачного слоя, т.е. при водозапасе облаков $W = 0$, а \mathbf{J}_2 – якобиан радиоярких температур СВЧ радиометрического многоканального комплекса для вектора состояния облачной атмосферы \vec{a} , при наличии облачного слоя с $W > 0$.

Для оценки эффективности учета наличия облачного слоя применим отношение, аналогичное (6):

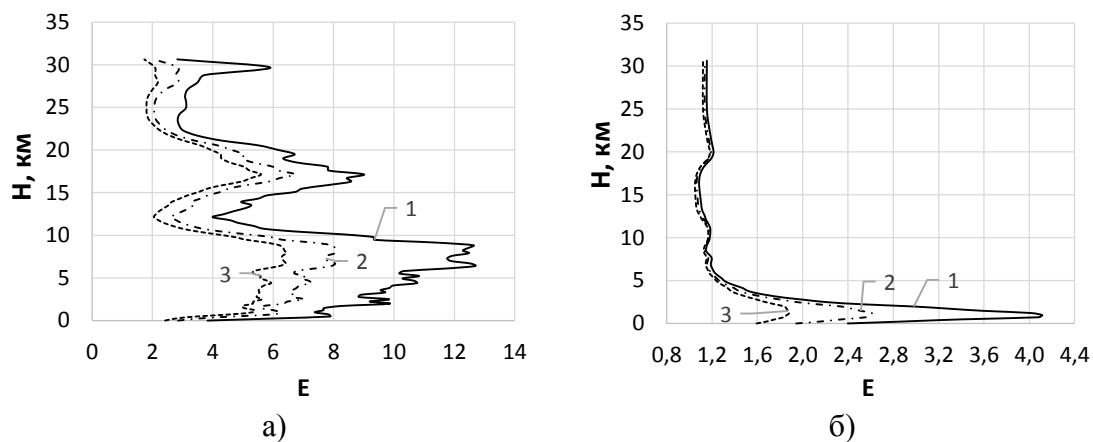
$$H_k = \frac{\sigma_{1k}}{\sigma_{2k}}, \quad k = \overline{1, 2 \times K} \quad (12)$$

2. Проверка эффективности использования дополнительной априорной информации

Верификация эффективности использования дополнительной априорной информации при решении обратной задачи методом статистической регуляризации [6,7] была проведена на специальном стенде системы восстановления атмосферных профилей по данным спутниковых СВЧ радиометрических измерений. При тестировании эффективности были использованы показатели эффективности, определяемые отношениями (2), (6), (12) по модельным радиоярким температурам восходящего излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность», рассчитанным по температурно-влажностным профилям атмосферы, измеренным с радиозондов. Для моделирования СВЧ спектров использован пакет программного обеспечения ARTS [27]. При моделировании оценивались спектры СВЧ излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность» в диапазоне от 10 до 200 ГГц.

Априорные данные для оценки ковариационной матрицы были получены в результате статистического анализа радиозондовых измерений параметров атмосферы в безоблачных условиях, представленных в базе данных SeeBor [28]. На рис. 1 приведены результаты анализа показателя эффективности применения априорной информации \mathbf{E} по данным из базы SeeBor, содержащей данные радиозондовых измерений атмосферных профилей в августе месяце в зоне умеренных широт от 30° до 60° с.ш., при отражательной

способности поверхности Земли $r = 0,5$. Эти данные подтверждают высокую эффективность применения указанной априорной информации 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 метода достаточно высока.



**Рисунок 1 - Профиль эффективности E (5) применения априорной информации для восстановления температуры (а) и влажности (б).
1 - $\varphi = 0,1$ К, 2 - $\varphi = 0,5$ К, 3 - $\varphi = 1,0$ К.**

Априорные данные для оценки ковариационных матриц в формулах (10) и (11) были получены в результате статистического анализа радиозондовых дневных (12:00 UMT) измерений параметров атмосферы в облачных дневных условиях августа месяца. В набор анализируемых данных включены атмосферные профили, измеренные в период с 1973 по 2018 гг. на станции Долгопрудный [29]. В качестве типового облачного слоя для летних дневных условий нами были промоделированы (в соответствии с описанным в разделах 1.2 и 1.3 подходом к оценке эффективности учета модельных представлений о структуре облачного покрова (7-9)) 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/м³.

Результаты оценок эффективности применения априорной информации для метеоданных августа месяца г. Долгопрудный при наличии облачного слоя представлены на рис. 2(а) для температуры и рис. 2(б) для влажности. На рисунках в качестве иллюстрации представлены результаты оценки эффективности при моделировании облачного слоя мощностью 2 км с нижней кромкой на высоте 1,2 км и средней водностью 0,00025 кг/м³. Из рис. 2 следует, что в облачном слое эффективность влияния априорной информации как для температуры, так и для влажности, уменьшается.

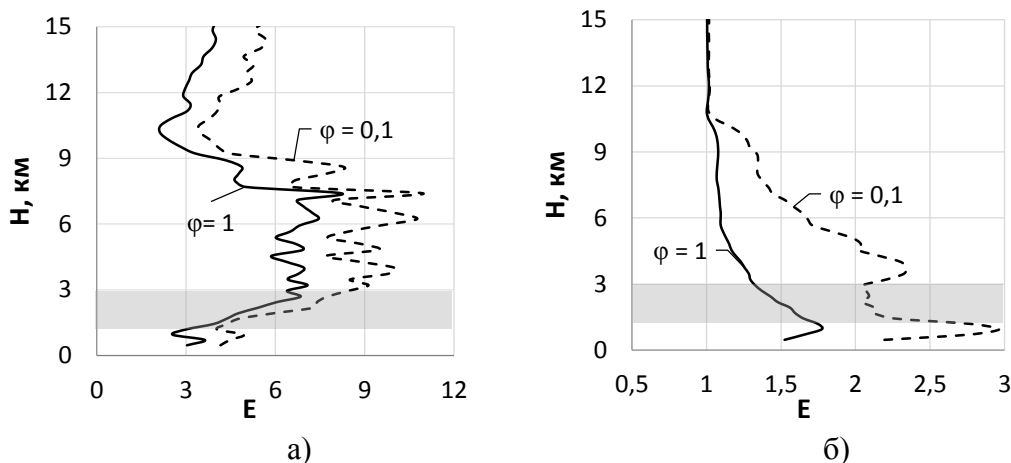


Рисунок 2 – Профиль эффективности E (5) для температуры (а) и влажности (б) при наличии облачного слоя на высотах от 1,2 до 3,2 км. Серым цветом отмечено расположение облачного слоя.

3. Заключение

Основным результатом работы является развитие метода оценки эффективности улучшения алгоритма восстановления параметров атмосферы за счет привлечения дополнительных источников априорной информации. 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, а также априорные модельные представления о характеристиках облачного слоя.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0030-2019-0008.

Литература

1. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М., ЛЕНАНАД, 2016, 336 с.
2. Лупян Е.А., Саворский В.П., Шокин Ю.И., Алексанин А.И., Назиров Р.Р., Недолужко И.В., Панова О.Ю. Современные подходы и технологии организации работы с данными дистанционного зондирования Земли для решения научных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012, Т.9, № 5, С. 21–44.
3. Strand O.N., Westwater BR. Statistical Estimation of the Numerical Solution of a Fredholm Integral Equation of the First Kind. J. Associat. Comput. Machin, 1968, 15:100-114.
4. Турчин В.Ф., Козлов В.П., Малкевич М.С. Использование методов математической статистики для решения некорректных задач. УФН, 1970, 102(3):345–386.
5. Горчакова И.А., Малкевич М.С., Турчин В.Ф. Определение вертикального профиля влажности атмосферы по измерениям собственного излучения Земли. Изв. АН СССР, сер. Физ. атм. и океана, 1970, 6:565.
6. Rodgers C.D. Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice. Singapore, World Scientific, 2000.
7. Lipton A.E. Satellite sounding channel optimization in the microwave spectrum. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(4):761-781.
8. Боровиков А.М., Гайворонский И.И., Зак Е.Г., Костарев В.В., Мазин И.П., Минервин, Хргиан А.Х., Шметер С.М. Физика облаков. Л., Гидрометеиздат, 1961, 459 с.
9. Хргиан А.Х.. Физика атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1969, 647 с.

10. Скацкий В.И. Исследование водности кучевых облаков // Труды Инст. Прикл. Геофизики. 1969, Вып.13, С. 43-66.
11. Фейгельсон Е.М. Лучистый теплообмен и облака. Л.: Гидрометеиздат, 1970, 226 с.
12. Шмелер С.М. Физика конвективных облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1972, 231 с.
13. Девятова В.А. Некоторые характеристики слоистообразных облаков // Метеорология и гидрология, 1973, №8, С.26-33.
14. Девятова В.А. Использование статистических характеристик вертикальной структуры полей однослойной слоистообразной облачности, температуры и влажности для решения некоторых обратных задач // Труды ГМЦ СССР, 1974, Вып. 148, С.73-90.
15. Бобылев Л.П., Васищева М.А., Образцов С.П., Попова Н.Д., Щукин Г.Г. Расчет характеристик радиотеплового излучения для различных моделей облачной атмосферы // Труды ГГО. Экспериментальная геофизика, 1975, Вып. 328, С.22-49.
16. Васищева М.А., Щукин Г.Г. Экспериментальные исследования водности облаков. Статистические модели атмосферы. Серия Метеорология. Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 1976, 93 с.
17. Дубровина Л.С. Облака и осадки по данным самолетного зондирования. Л., Гидрометеиздат, 1982, 216 с.
18. Облака и облачная атмосфера. Справочник. Под редакцией Мазина И.П., Хргиана А.Х. Л., Гидрометеиздат, 1989, 647 с.
19. International Cloud Atlas // World Meteorological Organization. 2018. Режим доступа: <https://cloudatlas.wmo.int/clouds.html>.
20. Атлас облаков. Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Гл. геофиз. Обсерватория им. А.И. Воейкова ; [Д. П. Беспалов и др. ; ред.: Л. К. Сурыгина]. Санкт-Петербург : Д'Арт, 2011, 248 с.
21. EECRA. Extended Edited Synoptic Cloud Reports Archive- Режим доступа: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/extended-edited-synoptic-cloud-reports-archive-eeera-ships-and-land-stations-over-globe>.
22. ISCCP. The International Satellite Cloud Climatology Project - Режим доступа: <https://isccp.giss.nasa.gov/>.
23. Аквилонова А.Б., Кутуза Б.Г. Радиотепловое излучение облаков // Радиотехника и электроника, 1978, Т.23, №9, С. 1792-1806.
24. Войт Ф.Я., Мазин И.П. Водность кучевых облаков // Изв. АН ССР. Физика атм. и океана, 1972, Т.8, №11, С. 1166-1176.
25. Дубровина Л.С. Зависимость между вертикальной мощностью облаков и высотами их границ // Труды ВНИИГМИ-МЦД, 1974. Вып. 7. С. 3-11.
26. Копрова Л.И., Болдырев В.Г. О статистических характеристиках вертикальной структуры полей температуры и влажности до больших высот // Изв. АН ССР. Физика атм. и океана. 1970, Т.6, №2, С. 154-167.
27. Eriksson P.S., Buehler A., Davis C.P., Emde C., Lemke O. ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator, version 2. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112(10): 1551–1558.
28. SeeBor V5.1 Training data set (2019), Available at: http://cimss.ssec.wisc.edu/training_data/data/SeeBorV5.1_Training_data_Emis10inf2004.bin, дата просмотра 16.04.2019.
29. Wyoming Weather Web. Upperair Air Data. Soundings. Режим доступа: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, дата просмотра 16.04.2019.