

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ. ОБРАБОТКА
ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 551.510

В.С. Комаров, А.В. Креминский

**ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ММГУА* ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ
(ПРОГНОЗА) ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОДОБЛАЧНОМ
СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Рассмотрен один из способов повышения эффективности спутникового термического зондирования в условиях облачной атмосферы, который основан на одновременном использовании надоблачных измерений, полученных с помощью ИСЗ, и результатов статистического прогноза профиля температуры в подоблачном слое, осуществленного на основе алгоритма модифицированного МГУА.

Изучение и успешное прогнозирование физических процессов, протекающих в различных слоях атмосферы, невозможно без наличия надежной метеорологической информации, собираемой со значительных по площади территорий. Так, например, при составлении прогноза погоды с заблаговременностью более 1–2 сут уже должна использоваться глобальная (полушарная) информация [1]. Однако по ряду причин существующая сеть наблюдательных (и особенно аэрологических) станций распределена по территории земного шара крайне неравномерно. Поэтому в последние годы для повышения надежности глобальной метеорологической информации, используемой для анализа и прогноза физических процессов и полей, стали применяться также данные спутниковых измерений. Дополнение данных обычных наблюдений, поступающих с сети аэрологических и метеорологических станций, результатами дистанционного зондирования из Космоса позволило достичь необходимого пространственно-временного разрешения получаемой информации. Однако при этом возникли определенные трудности, связанные со значительным снижением объема глобальной спутниковой информации при наличии под зондирующей системой облачной атмосферы.

Известно, что реальная атмосфера может содержать на различных высотах (и особенно в тропосфере) облака различных форм и оптических свойств, причем в любой момент времени они могут занимать около 50% поверхности Земли [2]. Этот фактор может существенно усложнить, а в ряде случаев (например, при наличии сплошной облачности нижнего яруса) и вовсе исключить возможность получения какой-либо информации о состоянии подоблачного слоя атмосферы на основе спутниковых измерений уходящего излучения $I_{\Delta v}^{\uparrow}$ в ИК-диапазоне. Это хорошо видно из следующего соотношения [3]:

$$I^{\uparrow} = N I_{\Delta v}^{\uparrow} + (1 - N) I_{\Delta v}^{\uparrow}, \quad (1)$$

где $I_{\Delta v}^{\uparrow}$ и $I_{\Delta v}^{\uparrow}$ – интенсивность уходящего излучения при наличии сплошной облачности и безоблачной атмосферы соответственно; N – степень покрытия облаками поля зрения прибора. При $N = 1$ когда в поле зрения прибора наблюдается сплошная облачность, уходящее излучение подоблачной атмосферы $I_{\Delta v}^{\uparrow}$ нельзя определить, поскольку второй член правой части соотношения (1) равен нулю. Поэтому для оценки метеорологических величин (в частности, температуры) в подоблачном слое атмосферы необходимо привлечение какой-либо дополнительной априорной информации (статистической или прогностической).

Одним из возможных путей преодоления возникающих трудностей, связанных с решением задач термического зондирования для облачной атмосферы, является комплексный подход, основанный на одновременном использовании достаточно точных данных спутниковых наблюдений за температурой в средней и верхней тропосфере (их погрешность здесь порядка $1 - 2^{\circ}$ [3]), а

* Модифицированный метод группового учета аргументов.

также результатов ее статистического прогноза на нижележащих уровнях, т.е. в подоблачном слое, который осуществляется с помощью различных численных методов.

Среди этих методов наиболее широкое применение получили метод многомерной экстраполяции (см., например, [4,5]) и метод корреляции температуры нижней тропосферы с наземной температурой, которая оценивается по данным спутниковых измерений в <окне прозрачности> атмосферы (спектральный интервал 8–12 мкм) [6].

Однако оба указанных метода требуют для своей реализации предварительного обобщения больших по объему массивов многолетних эмпирических наблюдений и получения нужных статистических параметров для огромного числа аэрологических станций, которые описывали бы вертикальную статистическую структуру метеорологических полей в глобальном масштабе, а также с необходимой точностью и адекватностью. Понятно, что на практике из-за значительной пространственно-временной изменчивости вертикальной структуры метеорологических полей (в том числе и поля температуры) [7] дать надежное глобальное статистическое описание этой структуры не представляется возможным.

Поэтому в настоящей статье предлагается иной подход к повышению эффективности термического зондирования для облачной атмосферы. Он основан на одновременном использовании спутниковых данных о температурной стратификации надоблачного слоя атмосферы и результатов статистического прогноза температуры ниже верхней границы облаков, который осуществляется с помощью ММГУА [8]. Выбор этого метода обусловлен рядом факторов, главными из которых являются:

- достаточная простота метода, не требующая большого объема исходных данных и значительных затрат машинного времени;
- отсутствие необходимости в предварительном статистическом усреднении многолетних рядов эмпирических наблюдений;
- возможность (на основе взятой априорной информации) синтезировать прогностическую модель в условиях частичной или полной неопределенности наших знаний о структуре моделируемого процесса и свойствах шумов в используемых данных.

Следует подчеркнуть, что применение алгоритмов ММГУА в решении задачи восстановления (прогноза) температурной стратификации в подоблачном слое атмосферы требует:

- задания вида и объема выборки экспериментальных данных;
- задания класса базисных функций (операторов), из которых формируется множество прогностических моделей;
- выбора метода оценивания параметров генерируемых моделей и метода поиска минимума критериев качества.

В нашем случае, как и ранее в [8], в качестве исходных экспериментальных данных использованы пространственно-временные наблюдения:

$$\{Y_{h,t}, h = 0, 1, \dots, h^*; t = 1, 2, \dots, N\};$$

$$\{Y_{h,t}, h = 0, 1, \dots, \bar{h} \leq h^*; t = N + 1\}, \quad (2)$$

здесь h – высота и t – время наблюдений, причем в отличие от [8] $h = 0$ соответствует начальному высотному уровню, с которого берутся данные спутниковых измерений, а в качестве базисных функций взяты смещенные разностные динамико-стохастические модели вида

$$Y_{h,N+1} = \sum_{\tau=1}^{N^*} A_{h,\tau} Y_{h,N+1-\tau} + \sum_{j=0}^{h-1} B_{h,j} Y_{j,N+1} + \varepsilon_{h,N+1} \quad (\text{при } h = \bar{h} + 1, 2, \dots, h^*), \quad (3)$$

где N^* – порядок запаздывания по времени ($N^* < [N - h - 1]/2$); $A_{h,1}, \dots, A_{h,N}$ и $B_{h,0}, \dots, B_{h,h-1}$ – неизвестные параметры модели; $\varepsilon_{h,N+1}$ – невязка модели.

Поскольку подробное описание процедуры выбора наилучшей модели, основанной на использовании методов направленного группового перебора (для оптимизации структуры модели) и минимаксного оценивания (для получения оценок параметров модели, позволяющей гарантировать качественный прогноз), проводилось ранее в [9], то в настоящей статье они не рассматриваются.

Остановимся теперь коротко на некоторых результатах оценки качества и эффективности выбранного подхода к прогнозу (восстановлению) температурной стратификации в подоблачном слое атмосферы при наличии сплошной однослойной облачности нижнего яруса (типа *St*, *Sc*, *Ns*). В связи с тем что в нашем распоряжении не было данных спутникового термического зондирования, подобная оценка осуществлялась для зимы и лета на основе многолетних (1961–1975 гг.) радиозондовых наблюдений четырех аэрологических станций (Кефлавик, Вена, Рим, Белград), представляющих различные физико-географические районы северного полушария. При этом для каждой станции и сезона с помощью выражения (3) было восстановлено около 50 вертикальных профилей, что позволило получить достаточно надежные оценки величин стандартных (среднеквадратических δ и относительных $\theta = \delta/\sigma$, % ошибок (здесь σ – среднее квадратическое отклонение, характеризующее изменчивость температуры на том или ином уровне атмосферы).

Следует также подчеркнуть, что при построении матрицы пространственно-временных наблюдений $Y_{h,t}$ были использованы статистические смешанные (с точки зрения количества облаков) выборки объемом до 16 профилей (при временном интервале в 12 ч), причем данные измерений температуры были приведены с помощью метода линейной интерполяции и изобарической системе координат с некоторым переменным шагом, который позволил использовать следующие уровни: Земля, 975 гПа (~0,25 км), 950 (~0,50), 925 (~0,75), 900 (~1), 875 (~1,25), 850 (~1,50), 825 (~1,75), 800 (~2), 750 (~2,5), 700 (~3), 650 (~3,5), 600 (~4), 500 (~5,5), 400 (~7) и 300 гПа (~9 км). Выбор данной системы координат обусловлен тем, что она согласно [7] является наиболее оптимальной с точки зрения информативности уровней атмосферы.

Стандартные (δ) и относительные (θ , %) погрешности прогноза температуры в подоблачном слое атмосферы (при наличии облаков типа *St*, *Sc* и *Ns*) по данным вышележащих уровней

Уровень восстановления, гПа	Кефлавик		Вена		Рим		Белград	
	δ	θ	δ	θ	δ	θ	δ	θ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Зима								
700	0,2	3	0,1	1	0,1	3	0,1	1
750	1,4	26	1,6	32	1,3	32	1,3	25
800	2,5	46	3,2	59	2,1	58	2,5	44
825	3,0	56	3,3	60	2,5	60	3,1	53
850	3,1	58	3,4	62	3,1	96	3,3	58
875	3,2	59	3,8	72	3,77	111	3,4	59
900	3,2	59	4,0	77	4,0	116	5,5	97
925	3,2	64	4,4	85	4,4	125	5,9	106
950	3,7	72	4,6	88	5,0	144	6,5	122
975	4,3	85	5,3	105	5,5	153	7,1	136
Земля	4,6	95	5,7	112	6,0	163	8,1	159
Лето								
700	0,3	7	0,9	23	0,1	3	0,2	6
750	0,9	26	1,5	39	0,8	22	0,9	26
800	1,5	47	1,9	47	1,5	40	1,7	46
825	1,8	49	2,0	47	1,9	49	2,1	55
850	2,1	59	2,0	47	2,0	51	2,3	56
875	2,1	59	2,0	47	2,0	52	2,5	57
900	2,2	63	2,0	47	2,2	57	2,6	58
925	2,3	65	2,5	56	2,5	63	2,9	63
950	2,7	94	2,8	63	3,0	81	3,5	73
975	3,2	109	3,4	73	3,8	104	3,8	75
Земля	3,5	121	3,9	82	4,3	119	4,1	79

Анализ результатов численной оценки качества восстановления температуры в подоблачном слое атмосферы (они приводятся в таблице) показывает следующее:

– алгоритмы ММГУА в случае использования данных надоблачных измерений дают достаточно надежное оценивание температурной стратификации подоблачного слоя атмосферы, поскольку повсеместно в большей части этого слоя, т.е. на высотах менее 3,5 км (где согласно [9] и наблюдаются плотные однослойные облака типа *St*, *Sc* и *Ns*), значения относительных ошибок прогноза θ существенно меньше допустимой величины θ_0 , равной 65% и применяемой обычно на практике при решении подобных задач;

– наиболее успешный прогноз (восстановление) температурного профиля в подоблачном слое атмосферы при использовании метода группового учета аргументов можно ожидать в летний период, когда оценивание этого профиля возможно до уровня 925 гПа (~ 0,75 км) и даже ниже;

– предложенный комплексный подход к оценке температуры подоблачного слоя атмосферы (при наличии облаков нижнего яруса) может дать достаточно хорошие результаты и при использовании в качестве надоблачных измерений данных спутникового термического зондирования.

В пользу последнего вывода говорит то, что величины погрешностей спутниковых измерений в средней и верхней тропосфере (на высотах 4–9 км) составляют для современных зондирующих систем, как уже было отмечено выше, около 1–2° [3], т.е. мало отличаются от ошибок наземного радиозондирования.

На основе полученных результатов можно сделать важный для практики вывод о том, что для повышения эффективности спутникового термического зондирования в условиях облачной атмосферы (особенно при наличии облаков нижнего яруса типа *St*, *Sc*, *Ns*) целесообразно применять комплексный подход, базирующийся на использовании данных ИСЗ о средней и верхней тропосфере (до высоты 9 км) и алгоритмов ММГУА, которые позволяют достаточно надежно восстанавливать температурную стратификацию подоблачного слоя. Единственным затруднением в этом случае является необходимость предварительного формирования для всей тропосферы (включая подоблачный слой) выборки вертикальных профилей температуры, требуемой для построения оптимальной прогностической модели. Однако эта задача может быть легко решена, если использовать с этой целью данные ближайшей (к месту зондирования) опорной аэрологической станции или результаты численного прогноза поля температуры, осуществляемого в Центрах метеорологических прогнозов.

В заключение следует сказать, что в дальнейших исследованиях по данной проблеме будет проводиться статистическая оценка точности восстановления профилей температуры по данным ИСЗ только в случаях сплошной облачности (8–10 баллов). При этом, как и в настоящей работе, в качестве исходных данных будет использоваться исходная выборка наблюдений, включающая в себя все случаи, независимо от наличия или отсутствия облачности.

1. Белов П. Н., Борисенков Е. П., Панин Б. Д. Численные методы прогноза погоды. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 376 с.
2. Глобальное поле облачности / Под ред. Л.Т. Матвеева. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 279 с.
3. Герман М. А. Космические методы исследования и метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 351 с.
4. Комаров В. С. // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 1974. Вып. 9. С. 19–24.
5. Комаров В. С. // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 1977. Вып. 42. С. 22–26.
6. Болдырев В. Г., Яковлева Э. А. // Труды Гидрометеоцентра СССР, 1967. Вып. 11. С. 41–54.
7. Zuev B. E., Komarov V. S. Statistical Models of the Temperature and Gaseous Component of the Atmosphere. Dordrecht' Boston/Lancaster/Tokyo. D. Reidel Publishing Company, 1987. 306 p.
8. Кочерга Ю. Л. // Автоматика. 1991. N 5. С. 80–87.
9. Комаров В. С., Акселевич В. И., Креминский А. В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 2. С. 231–238.
10. Облака и облачная атмосфера. Справочник / Под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 647 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
7 апреля 1994 г.

V. S. Komarov, A. V. Kreminskii. Use of MMGA Algorithms for Numerical Restoration (Prediction) of Temperature Vertical Profiles in the Atmospheric Layer under Clouds Based on Satellite Data.

A way is observed of increasing an efficiency of the satellite sounding of temperature under cloudy conditions based on simultaneous use of data from satellite sounding above clouds and results of statistical prediction of the temperature profile in the atmospheric layer under clouds based on MMGA algorithm.