

В.С. Комаров, А.В. Креминский, Г.Г. Матвиенко

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ СПУТНИКОВОГО ВЕТРОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

Обсуждаются возможности применения модифицированной версии метода группового учета аргументов (МГУА) в задаче предвычисления вертикальных профилей зональной и меридиональной составляющих скорости ветра по данным спутниковых ветровых измерений, проведенных на вышележащих уровнях тропосферы. На конкретных примерах продемонстрирована эффективность подобного комплексного подхода и показана его перспективность при решении задач спутникового ветрового зондирования в условиях облачной атмосферы, в том числе и с помощью бортового доплеровского лидара.

В последние годы достигнут значительный прогресс в области прогноза погоды и моделирования общей циркуляции атмосферы (ОЦА). Но для дальнейшего увеличения качества прогнозов и моделей ОЦА требуются более полные и надежные метеорологические данные о физическом состоянии атмосферы, облачности и подстилающей поверхности, которые не только бы охватывали всю территорию земного шара, но и были бы представлены с достаточно большим пространственным и временным разрешением. Очевидно, что подобные данные могут быть получены лишь при использовании результатов глобальных наблюдений, проведенных различными измерительными системами, которые находятся как на поверхности земли, так и на борту космических аппаратов.

В планах построения Глобальной системы наблюдения (ГСН), проводимого Всемирной метеорологической организацией, предполагается, что к концу нынешнего тысячелетия эта система должна основываться на следующих принципах [1]:

- для точного описания той или иной метеорологической величины должны быть использованы данные, полученные от различных систем измерения;
- ГСН должна состоять из двух подсистем: подсистемы, расположенной на поверхности земли (базовая синоптическая сеть), и подсистемы, расположенной в космосе (спутниковое дистанционное зондирование);
- подсистема, расположенная в космосе, должна быть центром ГСН, поскольку она будет обеспечивать полный охват всех регионов, в том числе тех, где отсутствует информация от базовой синоптической сети.

Таблица 1

Требования к данным ветровых измерений, осуществляемых с помощью МСЗ [1, 3]

Параметры измерений ветрового лидара	Достигнутые значения	Требуемые значения	
		стратосфера	тропосфера
Горизонтальное разрешение, км	2600	100 (50)	100 (50)
Вертикальное разрешение, км	1,5	3	1 (в слое) 2–15, 0,5 ниже 2
Точность измерения составляющих скорости ветра, м/с	4	2–3	1–2
Число измерений в сутки	1	4	4

Известно, что ветер является одной из важнейших характеристик земной атмосферы и играет существенную роль при решении задач оперативного прогноза и моделирования глобального климата. Кроме того, он имеет большое значение и при решении многочисленных прикладных задач. Но для получения полной и надежной информации о пространственном (в том числе вертикальном) распределении ветра имеющихся наземных измерений (радиозонды,

шар-пилоты, ракеты) явно недостаточно, даже в случае расширения наблюдательной сети. Существующие же подходы к оценке глобального поля ветра по спутниковым наблюдениям за перемещением облачных систем [2] или распределением температуры, влажности и облачности [3] характеризуются малой точностью и не отвечают современным требованиям как численного прогноза (эти требования приведены в табл. 1), так и многих прикладных задач.

Поэтому в последние годы разрабатывается иной подход к определению ветра из космоса, который базируется на использовании новейших методов и технических средств дистанционного зондирования. Среди них самым перспективным и надежным (с точки зрения оценки поля ветра из космоса) является метод ветрового лидарного зондирования, позволяющий получать информацию о ветре в глобальном масштабе, с большим пространственно-временным разрешением и достаточно высокой точностью.

Исследования последних лет (см., например, [4]) показали, что в качестве основы ветрового лидара целесообразнее всего использовать доплеровский CO₂-лазер.

Однако практическое создание спутникового доплеровского лидара требует преодоления значительных технических и технологических трудностей. Поэтому подобная система находится пока еще в стадии разработки. И все же уже сейчас, основываясь на результатах натурных экспериментов, проведенных с земли и с борта самолета (см. обзор [1]), можно сказать, что доплеровский лидар, установленный на борту космической системы, может стать достаточно надежным измерительным средством для оценки характеристик ветра из космоса. Так, например, согласно [1], точность измерения характеристик ветра в тропосфере составляет около 2–5 м/с.

Но получение данных о вертикальном распределении ветра во всем атмосферном канале (от спутника до Земли) возможно лишь в безоблачных условиях, так как наличие сплошной облачности нижнего яруса (типа St, Sc, Ns) препятствует измерениям ветра в подоблачном слое атмосферы. Учитывая это обстоятельство, авторы настоящей статьи предложили для решения данной проблемы применить комплексный подход (о методике и результатах его реализации пойдет речь ниже), который основан на одновременном использовании достаточно точных лидарных измерений ветра в надоблачном слое (выше 3–4 км), проведенных с борта космического аппарата, и результатов его статистического прогноза на нижележащих уровнях, т.е. в подоблачном слое атмосферы.

Здесь следует подчеркнуть, что в отличие от температурной стратификации подоблачного слоя, которую можно частично восстановить по спутниковым данным с помощью метода многомерной статистической экстраполяции (см., например, [5]), этот метод никак не может быть использован для предвычисления в указанном слое параметров ветра, поскольку для них характерна очень слабая межуровневая корреляция (что хорошо видно из табл. 2). Поэтому нами в настоящей статье для статистического прогноза поля ветра в подоблачном слое атмосферы, осуществляемого по данным спутниковых ветровых наблюдений, использован другой метод, а именно модифицированный метод группового учета аргументов (ММГУА), который показал свою достаточно эффективную эффективность при восстановлении зональной и меридиональной составляющих скорости ветра в свободной атмосфере по его измерениям на нижележащих уровнях [6, 7].

Выбор этого метода обусловлен тем, что для его реализации не требуется большого объема исходной информации, так как он работает в условиях частичной или полной неопределенности наших знаний о структуре моделируемого процесса. Длина же исходной выборки ограничена только одним условием:

$$M \geq N + 1 \quad (1)$$

где M – длина исходной выборки; N – число информативных уровней в одном профиле.

Численные эксперименты показали, что для нашего случая выборка должна включать около 16 профилей, что при измерениях с дискретностью 12 ч составит 8 суток. Здесь же следует отметить, что эта выборка должна формироваться по-разному на начальной и последующих этапах реализации взятого алгоритма. Так, например, на начальном этапе можно использовать:

- для условий безоблачной атмосферы фактические данные, полученные во всем атмосферном столбе с помощью космического ветрового лидара;
- для условий облачной атмосферы данные ближайшей опорной аэрологической станции или результаты численного прогноза поля ветра, осуществленного в Центре метеорологических прогнозов.

Автокорреляционные матрицы температуры (T), зональной (V_x) и меридиональной (V_y) составляющих скорости ветра, построенные по данным станции Рим (зима)

Высота, км	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	T									
0	1,00	0,78	0,43	0,31	0,32	0,31	0,29	0,26	0,21	0,07
1	0,78	1,00	0,88	0,68	0,66	0,59	0,54	0,50	0,45	0,25
2	0,43	0,88	1,00	0,91	0,86	0,76	0,69	0,64	0,59	0,35
3	0,31	0,68	0,91	1,00	0,95	0,85	0,77	0,71	0,65	0,37
4	0,32	0,66	0,86	0,95	1,00	0,97	0,93	0,86	0,77	0,41
5	0,31	0,59	0,76	0,85	0,97	1,00	0,99	0,92	0,81	0,41
6	0,29	0,54	0,69	0,77	0,93	0,99	1,00	0,96	0,85	0,44
7	0,26	0,50	0,64	0,71	0,86	0,92	0,96	1,00	0,91	0,52
8	0,21	0,45	0,59	0,65	0,77	0,81	0,85	0,91	1,00	0,82
9	0,07	0,25	0,35	0,37	0,41	0,41	0,44	0,52	0,82	1,00
	V_x									
0	1,00	0,54	-0,25	-0,28	-0,33	-0,32	-0,34	-0,34	-0,37	-0,38
1	0,54	1,00	0,64	0,38	0,29	0,20	0,19	0,22	0,21	0,19
2	-0,25	0,64	1,00	0,87	0,76	0,59	0,59	0,63	0,64	0,61
3	-0,28	0,38	0,87	1,00	0,83	0,61	0,59	0,64	0,64	0,61
4	-0,33	0,29	0,76	0,83	1,00	0,95	0,93	0,77	0,77	0,73
5	-0,32	0,20	0,59	0,61	0,95	1,00	0,98	0,74	0,73	0,69
6	-0,34	0,19	0,59	0,59	0,93	0,98	1,00	0,84	0,83	0,77
7	-0,34	0,22	0,63	0,64	0,77	0,74	0,84	1,00	0,97	0,90
8	-0,37	0,21	0,64	0,64	0,77	0,73	0,83	0,97	1,00	0,98
9	-0,38	0,19	0,61	0,61	0,73	0,69	0,77	0,90	0,98	1,00
	V_y									
0	1,00	0,37	-0,11	-0,09	-0,10	-0,10	-0,11	-0,12	-0,13	-0,14
1	0,37	1,00	0,85	0,65	0,61	0,55	0,50	0,42	0,40	0,37
2	-0,11	0,85	1,00	0,89	0,84	0,77	0,72	0,64	0,64	0,60
3	-0,09	0,65	0,89	1,00	0,95	0,87	0,83	0,77	0,77	0,74
4	-0,10	0,61	0,84	0,95	1,00	0,98	0,96	0,90	0,89	0,86
5	-0,10	0,55	0,77	0,87	0,98	1,00	0,99	0,93	0,92	0,88
6	-0,11	0,50	0,72	0,83	0,96	0,99	1,00	0,97	0,96	0,91
7	-0,12	0,42	0,64	0,77	0,90	0,93	0,97	1,00	0,98	0,92
8	-0,13	0,40	0,64	0,77	0,89	0,92	0,96	0,98	1,00	0,98
9	-0,14	0,37	0,60	0,74	0,86	0,88	0,91	0,92	0,98	1,00

На последующих этапах при наличии облачности могут быть использованы совмещенные профили, т.е. как оцененные с помощью спутниковых данных (в надоблачном слое), так и восстановленные (на нижележащих уровнях).

Рассмотрим теперь некоторые результаты оценки качества и эффективности выбранного подхода к прогнозу (восстановлению) ветра в подоблачном слое атмосферы при наличии сплошной однослойной облачности нижнего яруса с облаками типа St , Sc , Ns .

В связи с тем что натурные эксперименты с доплеровским лидаром, устанавливаемым на борту космической системы, до настоящего времени еще не проводились, оценка прогноза осуществлялась нами на примере данных радиозондирования. С этой целью были использованы для зимы и лета многолетние (1961–1975 гг.) радиозондовые наблюдения четырех аэрологических станций: Кефлавик ($63^{\circ}51'$ с.ш., $22^{\circ}31'$ з.д.), Рим ($41^{\circ}48'$ с.ш., $12^{\circ}38'$ в.д.), Вена ($48^{\circ}15'$ с.ш., $16^{\circ}22'$ в.д.), Белград ($44^{\circ}47'$ с.ш., $20^{\circ}32'$ в.д.), представляющих различные физико-географические районы северного полушария. При этом для каждой станции и сезона было восстановлено по 90 вертикальных профилей и рассчитано такое же число отклонений зональной ($\Delta u = u^* - u$) и меридиональной ($\Delta v = v^* - v$) составляющих скорости ветра (здесь u^* и v^* – восстановленные значения параметров ветра, а u и v – те же параметры, но оцененные по данным радиозондовых наблюдений). Это позволило получить достаточно надежные оценки величин стандартных (среднеквадратических) δ и относительных ошибок $\theta = \delta/\sigma$, выраженных в процентах (здесь σ – среднеквадратическое отклонение, характеризующее изменчивость поля ветра на том или ином уровне), а также рассчитать вероятности отклонений Δu и Δv менее ± 1 , ± 2 , ± 3 , ± 4 и более ± 4 м/с.

Следует также подчеркнуть, что при прогнозировании (восстановлении) вертикальных профилей ветра данные его измерений в тропосфере (до 9 км) были приведены с помощью процедуры линейной экстраполяции к стандартной сетке высот, которая будет использоваться при ветровом лидарном зондировании из космоса. С этой целью в соответствии с табл. 1 были использованы следующие стандартные высоты: 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 км

Таблица 3

Результаты статистических оценок точности прогноза параметров ветра в подоблачном слое атмосферы по данным на уровнях 4–9 км														
Уровень восстановления, км	Зима							Лето						
	δ , м/с	θ , %	Вероятность ошибок, м/с					δ , м/с	θ , %	Вероятность ошибок, м/с				
			≤ 1	≤ 2	≤ 3	≤ 4	> 4			≤ 1	≤ 2	≤ 3	≤ 4	> 4
Зональная составляющая скорости ветра V_x (ст. Рим)														
0	12,8	185	0,03	0,11	0,27	0,34	0,66	7,8	114	0,11	0,28	0,37	0,47	0,53
0,5	9,2	148	0,12	0,20	0,30	0,42	0,58	5,8	83	0,14	0,32	0,43	0,60	0,40
1,0	5,8	106	0,14	0,28	0,46	0,58	0,42	4,6	64	0,16	0,41	0,54	0,69	0,31
1,5	4,1	90	0,14	0,40	0,51	0,72	0,28	4,5	62	0,26	0,48	0,61	0,71	0,29
2,0	2,9	54	0,28	0,51	0,74	0,87	0,13	3,1	43	0,40	0,61	0,73	0,81	0,19
3,0	0,2	2	0,99	1,00	1,00	1,00	0,00	0,4	5	0,98	1,00	1,00	1,00	0,00
Зональная составляющая скорости ветра V_x (ст. Кефлавик)														
0	10,4	186	0,06	0,12	0,18	0,31	0,69	7,1	136	0,09	0,19	0,31	0,44	0,56
0,5	7,1	119	0,10	0,22	0,34	0,43	0,57	5,1	102	0,19	0,29	0,43	0,61	0,39
1,0	5,5	83	0,16	0,31	0,47	0,60	0,40	4,3	91	0,17	0,43	0,53	0,67	0,33
1,5	4,9	79	0,18	0,34	0,49	0,62	0,38	3,9	79	0,23	0,36	0,54	0,74	0,26
2,0	3,8	57	0,29	0,46	0,68	0,79	0,21	3,0	63	0,29	0,54	0,71	0,84	1,16
3,0	0,2	2	0,99	1,00	1,00	1,00	0,00	0,3	6	0,98	0,99	1,00	1,00	0,00
Меридиональная составляющая скорости ветра V_y (ст. Рим)														
0	12,8	185	0,03	0,11	0,27	0,34	0,66	7,8	114	0,11	0,28	0,37	0,47	0,53
0,5	9,2	148	0,12	0,20	0,30	0,42	0,58	5,8	83	0,14	0,32	0,43	0,60	0,40
1,0	5,8	106	0,14	0,28	0,46	0,58	0,42	4,6	64	0,16	0,41	0,54	0,69	0,31
1,5	4,1	90	0,14	0,40	0,51	0,72	0,28	4,5	62	0,26	0,48	0,61	0,71	0,29
2,0	2,9	54	0,28	0,51	0,74	0,87	0,13	3,1	43	0,40	0,61	0,73	0,81	0,19
3,0	0,2	2	0,99	1,00	1,00	1,00	0,00	0,4	5	0,98	0,99	1,00	1,00	0,00
Меридиональная составляющая скорости ветра V_y (ст. Кефлавик)														
0	8,9	155	0,08	0,22	0,28	0,33	0,67	5,4	128	0,21	0,40	0,52	0,63	0,37
0,5	6,4	133	0,12	0,27	0,32	0,42	0,58	4,1	116	0,29	0,51	0,63	0,72	0,28
1,0	3,8	99	0,22	0,39	0,58	0,69	0,31	2,8	101	0,40	0,60	0,76	0,83	0,17
1,5	2,0	74	0,47	0,70	0,86	0,96	0,04	2,5	87	0,44	0,66	0,79	0,91	0,09
2,0	1,5	52	0,52	0,81	0,96	0,99	0,01	1,8	59	0,53	0,77	0,90	0,96	0,04
3,0	0,8	25	0,84	0,93	1,00	1,00	0,00	0,7	21	0,89	0,98	0,99	1,00	0,00

Анализ результатов численной оценки качества прогноза высотной структуры поля ветра в подоблачном слое атмосферы по данным наблюдений на вышерасположенных уровнях (эти результаты для двух типичных станций – Кефлавик и Рим – приводятся в табл. 3) показывает:

1) Применение алгоритма модифицированной версии МГУА для решения поставленной задачи дает достаточно надежное оценивание высотных профилей V_x и V_y вплоть до уровня 2 км, т.е. на 2 км ниже исходной высоты 4 км, где имеются фактические наблюдения за ветром и которая располагается всегда над верхней границей плотных однослойных облаков типа St , Sc , и Ns (согласно [8] эта граница обычно находится на высотах ниже 2,0–2,8 км). При этом на уровне 2 км относительные ошибки прогноза зональной и меридиональной составляющих скорости ветра повсеместно не превышают предельной погрешности, равной 65% (она используется наиболее часто при проведении различных статистических оценок), а вероятность допустимых отклонений тех же параметров ветра от их реальных значений, т.е. вероятность ошибок менее требуемой величины 2 м/с [1], составляет здесь от 0,42 до 0,81, т.е. является достаточно высокой.

Здесь следует отметить, что вероятность ошибок (≤ 4 м/с), которые удовлетворяют во многих случаях требованиям практики [9], достигает уже повсеместно 0,67–0,99;

2) Предложенный комплексный подход к определению параметров ветра в подоблачном слое атмосферы может дать вполне надежные результаты и при использовании в качестве исходной информации не данных радиозондирования, а спутниковых ветровых измерений, проведенных на вышерасположенных уровнях с помощью бортового доплеровского лидара.

Последний вывод можно сделать из того предположения, что ожидаемые ошибки измерений разрабатываемых ветровых лидаров данного типа будут находиться в тех же пределах (1–2 м/с), в каких находятся погрешности наблюдений современных радиозондов [10].

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать важный для практики вывод о том, что для повышения эффективности работы ветрового доплеровского лидара, устанавливаемого на борту космических аппаратов, в условиях облачной атмосферы (при наличии плотных однослойных облаков типа St , Sc и Ns) целесообразно применять комплексный подход, который базируется на совместном использовании данных измерений этого лидара в средней и верхней атмосфере (на высотах 9–4 км) и алгоритмов модифицированной версии МГУА, позволяющих достаточно надежно восстанавливать высотную структуру поля ветра в подоблачном слое (на глубину не менее 2 км).

1. Betout P., Burrige D., Werner Ch. Doppler Lidar Working Group Report. ESA Publication Division ESTEC. Noordwijk, the Netherlands, 1969.
2. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.А. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 280 с.
3. Герман М.А. Космические методы исследования в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 367 с.
4. Werner Ch., Renger W., Ehret G., Krichbaumer W., Streicher J. Lidar in Space. Proposal for space borne Lidar application on MIR-2 (or on ALMAZ) Report Institutes of Optoelectronics and Atmospheric Physics. May 1993.
5. Комаров В.С. Некоторые результаты оценки восстановления профиля температуры в подоблачном слое атмосферы по данным спутниковой информации и априорной статистики. Труды ВНИИГМИ-МЦД, 1977. Вып. 42. С.22–26.
6. Комаров В.С., Акселевич В.И., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. №2. С. 231–232.
7. Комаров В.С., Акселевич В.И., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. №2. С. 238–243.
8. Облака и облачная атмосфера: Справочник / Под ред. Н.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 647 с.
9. Захаров В.М., Костко О.К., Хмелевцов С.С. Лидары и исследование климата. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 320 с.
10. О составе точности и пространственно-временном разрешении информации, необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов / Под ред. М.А. Петросянца, В.Д. Решетова. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 219 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск

Поступила в редакцию 15 июля 1994 г.

V. S. Komarov, A. V. Kreminskii, G. G. Matvienko. **Comprehensive Approach to the Problems of Wind Sounding from Satellites under Condition of Cloudy Atmosphere.**

Potentialities are discussed of an improved method of the group account of arguments (MGAA) for solving a problem of precomputation of vertical profiles of zonal and meridional components of wind velocity upon satellite data on wind measurements conducted inside upper tropospheric layers. Particular examples demonstrate an efficiency of such integral approach as well as its fruitfulness in solving the problems of the wind sounding under conditions of cloudy atmosphere by means of spaceborne Doppler lidar.