

**В.С. Комаров, В.И. Акселевич, А.И. Гришин, А.В. Креминский, Н.Я. Ломакина,
Г.Г. Матвиенко**

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СВЕРХКРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРА ПО ДАННЫМ ВЕТРОВОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассматривается локальная эмпирическая модель ветра для пограничного слоя атмосферы, построенная по данным измерений трехтрассового корреляционного лидара. Оценивается качество сверхкраткосрочного (с предсказуемостью от 4 до 12 ч) прогноза зонального и меридионального ветра, осуществляемого с помощью ММГУА.

Изучение поля ветра по данным ветрового лидарного зондирования, которое получает в последнее время все большее распространение в метеорологической практике (см, например, [1–3]), открывает новые и более широкие возможности для детального исследования особенностей атмосферной циркуляции в пограничном слое (т.е. до высоты 1–2 км). Это связано с тем, что в отличие от данных радиозондовых наблюдений за ветром, обладающих недостаточной надежностью (из-за больших скоростей подъема радиозондов порядка 150–300 м/мин) и малым разрешением по высоте и по времени (не более 4 раз в сутки), результаты ветрового лидарного зондирования характеризуются высоким пространственно-временным разрешением и вполне приемлемой для практики точностью, оценка которой дается в [2, 4, 5]. Подобное обстоятельство имеет важное значение не только при исследовании локальной структуры поля ветра в нижней атмосфере, но и при решении задач атмосферно-экологического мониторинга, в частности задач диагностики и прогноза пространственного распространения взвешенных в атмосфере субстанций антропогенного происхождения, определяемого в значительной мере состоянием ветрового режима. Это хорошо видно из уравнения переноса антропогенных примесей, которое может быть записано в виде [6, 7]

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -\left(u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y}\right) - w \frac{\partial s}{\partial z} - \frac{\partial w_a s}{\partial z} + k_p \left(\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial s}{\partial z} - \epsilon_a, \quad (1)$$

где s – концентрация какой-либо примеси; t – время; u, v, w – горизонтальные и вертикальные составляющие скорости ветра, соответствующие осям x, y, z ; w_a – собственная вертикальная скорость примеси a ; $k_p = k_x = k_y$ и k – коэффициенты турбулентности; $\epsilon_a = \epsilon_a(x, y, z, t)$ – источник (сток) примеси a .

Здесь следует подчеркнуть, что согласно [8] вектор горизонтального перемещения s -частицы от источника выброса до точки падения на поверхности земли пропорционален интегралу по вертикали от вектора скорости ветра, т.е.

$$s \sim \frac{1}{h} \int_0^h \mathbf{v}(z) dz, \quad (2)$$

где h – высота источника загрязнения. Поэтому на практике для расчетов распространения облака загрязняющих примесей обычно используют зональную и меридиональную составляющие вектора ветра, усредненного по вертикальным слоям $h - h_0$ (при $h_0 = 0$) (или иначе вектора среднего ветра) [8, 9]:

$$\langle \mathbf{v} \rangle_{0,h} = \frac{1}{h} \int_0^h \mathbf{v}(z) dz. \quad (3)$$

Учитывая все вышесказанное, авторы сделали попытку провести на основе данных ветрового лидара построение локальной эмпирической модели ветра для пограничного слоя атмосферы, а также оценку качества сверхкраткосрочного (с предсказуемостью от 4 и до 12 ч) прогноза зональной и меридиональной составляющих вектора среднего ветра, осуществляемого с помощью модифицированного метода группового учета аргументов (ММГУА) [10], который, как показано в [9, 11], достаточно прост и не требует большого объема исходной информации для построения оптимальной прогностической модели. Основные результаты численных экспериментов по моделированию и прогнозу характеристик ветра по данным лидарного зондирования и являются предметом рассмотрения настоящей статьи.

Указанные эксперименты проводились нами на основе данных систематических натуральных наблюдений за ветром, осуществленных с помощью трехтрассового корреляционного лидара (схема и принципы его работы описаны в [12]) в районе г. Томска (56°с.ш., 85°в.д.) с 10 июня по 12 августа 1994 г. Всего для проведения численных экспериментов было использовано около 90 шестисрочных (2, 6, 10, 14, 18, 22 ч) наблюдений за профилем ветра в слое 140–1140 м и с пространственным разрешением 100 м, которое позволило достаточно детально изучить вертикальную структуру поля ветра в пограничном слое атмосферы (до высоты 1140 м). Что касается использованного для прогноза алгоритма ММГУА, то в настоящей статье он не приводится, поскольку этот алгоритм достаточно полно и подробно описан в [11, 13].

И наконец, следует отметить, что локальная эмпирическая модель ветра, о которой пойдет речь ниже, включает в свой состав вертикальные профили средних значений (\bar{x}) и стандартных (средних квадратических) отклонений (σ_x) скорости зонального (U) и меридионального (V) ветра, а также соответствующие корреляционные матрицы $\|R_U\|$ и $\|R_V\|$. В то же время точность прогнозирования характеристик вектора среднего ветра ($\langle U \rangle$ и $\langle V \rangle$) оценивается с помощью среднеквадратических (E) отклонений предвычисленных значений составляющих $\langle U \rangle$ и $\langle V \rangle$ от соответствующих измеренных значений и вероятности их расхождения менее $\pm 1, \dots, \pm 4$ м/с и более ± 4 м/с.

Рассмотрим результаты численных экспериментов по моделированию и прогнозу характеристик ветра по данным ветрового лидарного зондирования, причем в первую очередь остановимся на результатах построения локальной эмпирической модели. Для этого воспользуемся рис. 1–2, на которых приведены средние значения и стандартные отклонения составляющих скорости ветра, полученные для дня, ночи и в среднем для суток.

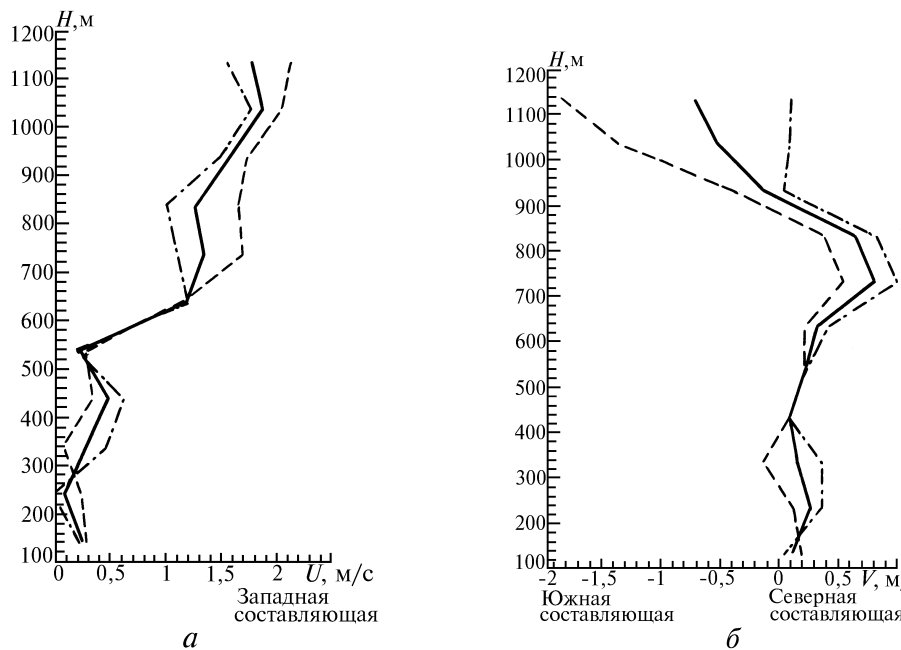


Рис. 1. Высотное распределение средних скоростей зонального (а) и меридионального (б) ветра. Сплошная линия – среднесуточный профиль; штрихпунктирная – день; штриховая – ночь

Из анализа рис. 1–2 следует, что:

1) летом для пограничного слоя атмосферы характерны малые (не более ± 2 м/с) средние скорости зонального и меридионального ветров и определенное их постоянство по высоте до уровней 550 и 650 м соответственно, выше которых и после некоторого максимума на высоте 750 м отмечается заметное усиление зонального и особенно меридионального ветра;

2) в отличие от зонального ветра суточная амплитуда (т.е. разница между днем и ночью) скорости меридионального ветра заметно увеличивается на высотах свыше 850 м и к уровню 1 100 м она достигает более 2 м/с;

3) для меридионального ветра на высотах более 850 м характерна смена его знака (в течение суток северный ветер, наблюдающийся в дневные часы, меняется на южный в ночное время суток);

4) вертикальное распределение стандартных отклонений скорости зонального и меридионального ветра имеет хорошо выраженную зависимость от высоты, изменяясь примерно от 1 м/с у земной поверхности до 5–6 м/с на уровне 1 100 м.

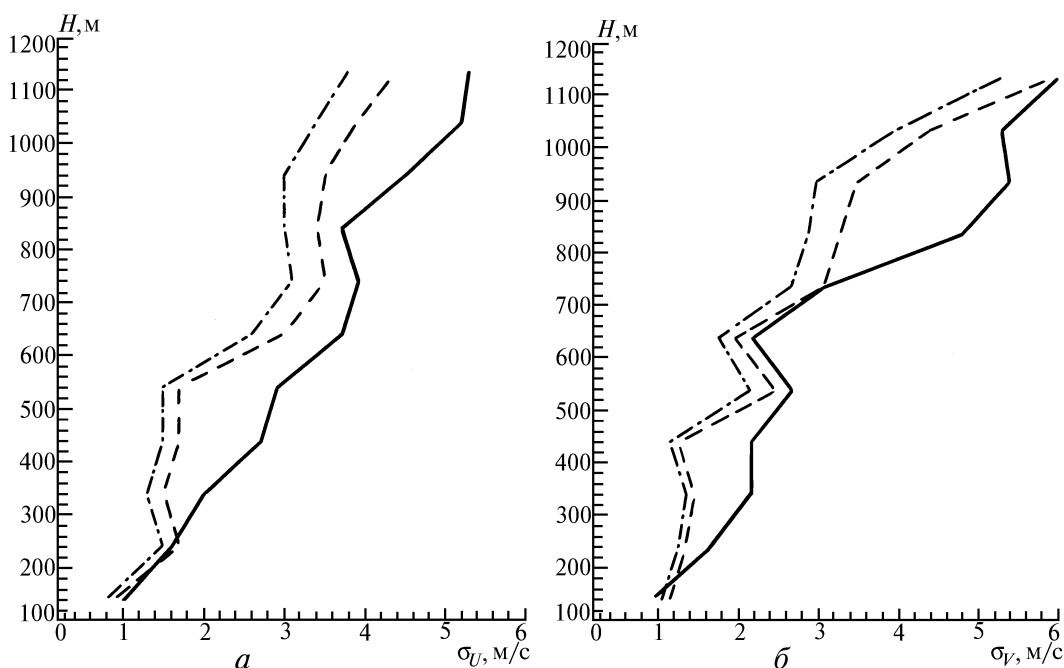


Рис. 2. Высотное распределение стандартных отклонений скорости зонального (а) и меридионального (б) ветра. Сплошная линия – среднесуточный профиль; штрихпунктирная – день; штриховая – ночь

Модельное описание вертикальной статистической структуры поля ветра не будет полным, если мы не рассмотрим особенности автокорреляционных связей этого метеорологического параметра. Это важно сделать и потому, что до сих пор еще нет достаточно надежных сведений об особенностях межуровневой связи ветра в пограничном слое, поскольку радиозондовые наблюдения не позволяют оценить их детально из-за малого высотного разрешения. С учетом указанных обстоятельств на основе данных ветрового лидара были рассчитаны также и корреляционные матрицы, дающие более полное представление о вертикальной структуре вариаций скоростей зонального и меридионального ветра в пограничном слое. Эти матрицы представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что как для зонального, так и для меридионального ветра характерны слабые межуровневые корреляционные связи на низких высотах (140–240 м). На вышележащих уровнях наблюдаются достаточно высокие коэффициенты корреляции, причем с ростом скорости ветра усиливаются и межуровневые связи.

Вторая часть настоящей статьи посвящена сверхкраткосрочному прогнозу (с предсказуемостью 4–12 ч) зонального и меридионального ветра, рассчитанному с помощью модифицированной версии ММГУА. В качестве исходной статистической выборки использовались 11 профилей вертикального распределения зонального и меридионального ветра (что согласно [9] является оптимальным количеством с точки зрения качества прогноза), а также их значения в слое 140–

240 м в срок наблюдения. Выбор этого слоя объясняется особенностями ветрового лидара, работоспособность которого падает при появлении облачности, особенно кучевой [5]. Имея же информацию на высотах до нижней границы облачности, мы можем достаточно надежно восстановить значения зонального и меридионального ветра на вышележащих уровнях.

Таблица 1

Автокорреляционные матрицы скорости зонального и меридионального ветра, построенные по данным наблюдений ветрового лидара

Уровни, м	140	240	340	440	540	640	740	840	940	1040	1140
Зональный ветер											
140	1,00	0,24	0,07	0,15	0,05	0,39	0,36	0,26	0,23	0,21	0,19
240	0,24	1,00	0,13	0,04	0,02	0,17	0,11	0,30	0,27	0,23	0,14
340	0,07	0,13	1,00	0,65	0,43	0,23	0,15	0,37	0,33	0,20	0,18
440	0,15	0,04	0,65	1,00	0,77	0,47	0,49	0,51	0,35	0,07	0,04
540	0,05	0,02	0,43	0,77	1,00	0,54	0,54	0,43	0,13	-0,11	-0,18
640	0,39	0,17	0,23	0,47	0,54	1,00	0,85	0,65	0,44	0,19	0,16
740	0,36	0,11	0,15	0,49	0,54	0,85	1,00	0,56	0,28	0,07	0,09
840	0,26	0,30	0,37	0,51	0,43	0,65	0,56	1,00	0,62	0,48	0,37
940	0,23	0,27	0,33	0,35	0,13	0,44	0,28	0,62	1,00	0,80	0,64
1040	0,21	0,23	0,20	0,07	-0,11	0,19	0,07	0,48	0,80	1,00	0,76
1140	0,19	0,14	0,18	0,04	-0,18	0,16	0,09	0,37	0,64	0,76	1,00
Меридиональный ветер											
140	1,00	-0,02	0,00	0,12	0,10	0,15	0,30	0,26	0,28	0,38	0,38
240	-0,02	1,00	0,01	-0,03	-0,01	0,08	0,08	-0,09	-0,06	0,00	0,13
340	0,00	0,01	1,00	0,41	0,59	0,46	0,31	0,22	0,22	0,26	0,26
440	0,12	-0,03	0,41	1,00	0,37	0,21	0,40	0,52	0,44	0,41	0,48
540	0,10	-0,01	0,59	0,37	1,00	0,70	0,42	0,34	0,26	0,36	0,35
640	0,15	0,08	0,46	0,21	0,70	1,00	0,54	0,37	0,04	0,24	0,40
740	0,30	0,08	0,31	0,40	0,42	0,54	1,00	0,77	0,48	0,50	0,61
840	0,26	-0,09	0,22	0,52	0,34	0,37	0,77	1,00	0,56	0,47	0,59
940	0,28	-0,06	0,22	0,44	0,26	0,04	0,48	0,56	1,00	0,82	0,56
1040	0,38	0,00	0,26	0,41	0,36	0,24	0,50	0,47	0,82	1,00	0,82
1140	0,38	0,13	0,26	0,48	0,35	0,40	0,61	0,59	0,56	0,82	1,00

Прогнозирование вертикального распределения зонального и меридионального ветра осуществлялось на срок 4, 8 и 12 ч. В ходе численного эксперимента было восстановлено 50 вертикальных профилей с заблаговременностью до 4 ч, 42 – до 8 ч и 30 – до 12 ч. Оценка качества прогноза осуществлялась с помощью средней квадратической погрешности E и вероятности P ошибок (отклонений восстановленных значений $\langle U \rangle$ и $\langle V \rangle$ от соответствующих фактических значений) менее $\pm 1, \dots, \pm 4$ м/с и более ± 4 м/с.

Далее остановимся на результатах численных экспериментов, приведенных в табл. 2–4, содержащих результаты статистической оценки качества прогноза высотной структуры поля ветра на периоды 4, 8 и 12 ч.

Таблица 2

Среднеквадратические погрешности E и вероятности P ошибок восстановления скорости зонального и меридионального ветра менее $\pm 1 - \pm 4$ и более ± 4 м/с, полученных с помощью ММГУА по данным измерений ветрового лидара с интервалом 4 ч

Слой восстановления, м	Вероятность, P					E
	$\leq \pm 1$ м/с	$\leq \pm 2$ м/с	$\leq \pm 3$ м/с	$\leq \pm 4$ м/с	$> \pm 4$ м/с	
1	2	3	4	5	6	7
Зональный ветер						
140 – 340	0,92	1,00	1,00	1,00	0,00	0,6
140 – 440	0,84	0,98	1,00	1,00	0,00	0,8
140 – 540	0,80	0,90	0,98	1,00	0,00	1,0
140 – 640	0,80	0,92	0,96	1,00	0,00	1,1
140 – 740	0,76	0,92	0,96	0,98	0,02	1,2
140 – 840	0,80	0,90	0,96	0,98	0,02	1,3
140 – 940	0,78	0,92	0,96	0,96	0,04	1,3
140 – 1040	0,76	0,88	0,94	0,96	0,04	1,4
140 – 1140	0,64	0,88	0,94	0,96	0,04	1,5

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
Меридиональный ветер						
140 – 340	0,94	0,97	0,97	0,97	0,03	0,7
140 – 440	0,91	0,94	0,97	0,97	0,03	1,0
140 – 540	0,82	0,91	0,94	0,97	0,03	1,4
140 – 640	0,73	0,91	0,94	0,97	0,03	1,6
140 – 740	0,73	0,85	0,94	0,97	0,03	2,0
140 – 840	0,67	0,85	0,91	0,97	0,03	2,2
140 – 940	0,61	0,85	0,90	0,94	0,06	1,7
140 – 1040	0,61	0,85	0,85	0,88	0,12	2,0
140 – 1140	0,61	0,79	0,85	0,88	0,12	2,3

Таблица 3

Среднеквадратические погрешности E и вероятности P ошибок восстановления скорости зонального и меридионального ветра менее $\pm 1 - \pm 4$ и более ± 4 м/с, полученных с помощью ММГУА по данным измерений ветрового лидара с интервалом 8 ч

Слой восстановления, м	Вероятность, P					E
	$\leq \pm 1$ м/с	$\leq \pm 2$ м/с	$\leq \pm 3$ м/с	$\leq \pm 4$ м/с	$> \pm 4$ м/с	
1	2	3	4	5	6	7
Зональный ветер						
140 – 340	0,91	0,98	1,00	1,00	0,00	0,7
140 – 440	0,82	0,95	0,98	1,00	0,00	1,1
140 – 540	0,77	0,91	0,93	0,98	0,02	1,3
140 – 640	0,75	0,86	0,91	0,91	0,09	1,7
140 – 740	0,73	0,89	0,93	0,93	0,07	1,9
140 – 840	0,64	0,86	0,95	0,95	0,05	1,8
140 – 940	0,61	0,80	0,93	0,93	0,07	2,1
140 – 1040	0,55	0,84	0,91	0,93	0,07	2,1
140 – 1140	0,55	0,80	0,89	0,93	0,07	2,2
Меридиональный ветер						
140 – 340	0,86	0,96	0,98	1,00	0,00	0,8
140 – 440	0,84	0,90	0,98	1,00	0,00	1,3
140 – 540	0,72	0,88	0,94	0,98	0,02	1,6
140 – 640	0,70	0,84	0,92	0,94	0,06	1,8
140 – 740	0,68	0,82	0,84	0,94	0,06	2,2
140 – 840	0,66	0,78	0,82	0,92	0,08	2,4
140 – 940	0,62	0,80	0,84	0,90	0,10	1,9
140 – 1040	0,60	0,78	0,86	0,90	0,10	2,1
140 – 1140	0,58	0,76	0,82	0,88	0,12	2,3

Таблица 4

Среднеквадратические погрешности E и вероятности P ошибок восстановления скорости зонального и меридионального ветра менее $\pm 1 - \pm 4$ и более ± 4 м/с, полученных с помощью ММГУА по данным измерений ветрового лидара с интервалом 12 ч

Слой восстановления, м	Вероятность, P					E
	$\leq \pm 1$ м/с	$\leq \pm 2$ м/с	$\leq \pm 3$ м/с	$\leq \pm 4$ м/с	$> \pm 4$ м/с	
1	2	3	4	5	6	7
Зональный ветер						
140 – 340	0,84	0,97	1,00	1,00	0,00	0,9
140 – 440	0,80	0,94	0,98	0,98	0,02	1,2
140 – 540	0,69	0,85	0,88	0,97	0,03	1,5
140 – 640	0,66	0,88	0,91	0,94	0,06	1,9
140 – 740	0,66	0,85	0,91	0,91	0,09	2,1
140 – 840	0,60	0,79	0,88	0,91	0,09	2,3
140 – 940	0,57	0,82	0,88	0,94	0,06	2,4
140 – 1040	0,57	0,82	0,88	0,91	0,09	2,5
140 – 1140	0,55	0,82	0,88	0,91	0,09	2,5

1	2	3	4	5	6	7
Меридиональный ветер						
140 – 340	0,82	0,93	0,95	0,98	0,02	1,0
140 – 440	0,80	0,86	0,91	0,93	0,07	1,6
140 – 540	0,70	0,82	0,86	0,89	0,11	1,9
140 – 640	0,64	0,77	0,84	0,89	0,11	2,2
140 – 740	0,64	0,82	0,84	0,86	0,14	2,3
140 – 840	0,59	0,80	0,84	0,86	0,14	2,3
140 – 940	0,59	0,82	0,91	0,93	0,07	2,0
140 – 1040	0,55	0,80	0,84	0,88	0,12	2,2
140 – 1140	0,57	0,73	0,76	0,84	0,16	2,3

Анализ данных табл. 2–4 показывает, что прогноз вертикального распределения ветра с помощью модифицированной версии МГУА является достаточно эффективным, причем для прогноза с предсказуемостью 4 ч высокие значения вероятности ($P > 0,6$) ошибок менее ± 1 м/с характерны для всего исследуемого слоя. С увеличением срока прогноза его качество несколько ухудшается, и при двенадцатичасовом прогнозе высокие значения вероятности для ошибок менее ± 1 м/с наблюдаются только в слое 140–740 м как для зонального, так и для меридионального ветра.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что ММГУА может быть использован для решения задач восстановления вертикального распределения ветра в пограничном слое атмосферы (0–1100 м) – основного фактора переноса атмосферных загрязнений, при этом дискретность исходной статистической информации, полученной с помощью ветрового лидара, не должна превышать для ошибок менее ± 1 м/с 6–7 ч (рис. 3). В то же время для нижней части пограничного слоя атмосферы (0–740 м) при тех же ошибках допустимая дискретность лидарных измерений составляет 12 ч.

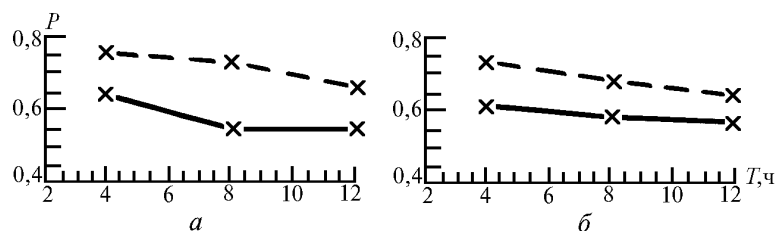


Рис. 3. Зависимость вероятности P ошибок прогноза зонального (a) и меридионального (b) ветра менее ± 1 м/с от временной дискретности лидарных наблюдений. Сплошная линия – для слоя 140 ÷ 1140 м; штриховая – 140 ÷ 740 м

В заключение нужно сказать, что вышеперечисленные выводы являются предварительными, поскольку моделирование и прогноз ветра проводились по данным одного сезона (лето) 1994 г. Для проверки и уточнения полученных результатов, естественно, требуется более длительный временной ряд ветрового лидарного зондирования.

- Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1992. 232 с.
- Гришин А.И., Зильберман А.Е., Матвиенко Г.Г. // 1 Межреспубл. симпозиум <Оптика атмосферы и океана>. Ч. 2. (Тезисы докл.). Томск, 1994. С. 36–37.
- Hardesty R. M. et al. // 14th ILRC. San Candido. 20–24 June. 1988. P. 440–443.
- Комаров В.С., Акселевич В.И., Креминский А.В., Матвиенко Г.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 2. С. 182–189.
- Белан Б.Д., Матвиенко Г.Г., Гришин А.И., Ковалевский В.К., Мелешкин В.Е. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 10. С. 1070–1077.
- Белов П.Н., Комаров В.С. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 2. С. 195–203.
- Владимиров А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г. Охрана окружающей среды. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 423 с.
- Брюхань Ф.Ф. Методы климатологической обработки и анализа аэрологической информации. М.: Гидрометеоздат, 1983. 112 с.
- Комаров В.С., Акселевич В.И., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 2. С. 238–243.

10. Кочерга Ю.Л. // Автоматика. 1991. N 5. С. 80–87.
11. Комаров В.С., Акселевич В.И., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 2. С. 231–237.
12. Матвиенко Г.Г., Задде Г.О., Фердинандов Э.С. и др. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра. Новосибирск.:Наука, 1985. 221 с.
13. Комаров В.С., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 7. С. 941–957.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
12 января 1995 г.

V.S. Komarov, V.I. Akselevich, A.V. Kreminskii, A.I. Grishin,
N.Ja. Lomakina, G.G. Matvienko. **Simulation and Supershort-range Forecasting of Wind Characteristics from Data of Lidar Wind Sounding.**

A local empiric model of wind for boundary atmospheric layer is treated in the paper. It is constructed based on measuring data of correlating three-path lidar. As well a quality of supershort-range forecasting (predictability from 4 to 12 hours) of zonal and meridional wind by the MGAA method is estimated.