

А.И. Гришин, Г.Г. Матвиенко

## ЛИДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ В ПЕРИОД КОМПЛЕКСНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «SATOR-91»

Проведены систематические исследования профилей скорости и направления ветра в нижней атмосфере в осенне-летний период 1991 года. Измерения осуществлялись бесконтактно с помощью лидара, реализующего корреляционный метод зондирования скорости и направления ветра, до высот 1,5...2 км. Показано, что в период комплексного озонового эксперимента «SATOR-91» наблюдались невысокие значения скорости ветра (менее 10 м/с), слабоизменяющиеся с высотой. Основное направление ветра было юго-западным.

При изучении баланса тропосферного озона весьма полезной представляется информация о движении воздушных масс. Особая роль, принадлежащая скорости ветра при интерпретации озонметрических измерений, вытекает из двух основных механизмов появления озона в тропосфере [1, 2]. Первый связан с образованием озона в результате фотохимических процессов с участием примесей, в том числе и антропогенных, а второй — с заток более богатого озоном стратосферного воздуха при массообмене между стратосферой и тропосферой. При этом профильные характеристики скорости ветра определяют интенсивность и направление притока воздушных масс, обогащенных озоном, либо примесями.

При выборе ветроизмерительной системы для сопровождения озонметрических наблюдений предпочтение следует отдать измерителю, имеющему высокое пространственное разрешение и произвольный (в отличие от аэрологических систем) период между измерениями профилей. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют лидарные измерители скорости ветра. В период комплексного эксперимента «SATOR-91» часть программы по изучению озона в нижней тропосфере выполнялась лидарным измерителем скорости ветра «ЛИСА».

Ниже приводятся результаты исследований профилей скорости и направления ветра в течение эксперимента «SATOR-91», полученные с помощью указанного лидара.

### Описание лидара «ЛИСА»

Ветроизмерительный лидар «ЛИСА» реализует корреляционный метод измерения скорости движения аэрозольных неоднородностей, увлекаемых ветровыми потоками, по трехточечной (трехтрассовой) схеме зондирования [3]. Подробно лидар описан в [4], здесь дадим лишь краткую характеристику методики зондирования и обработки сигналов. Функциональная схема лидара приведена на рис. 1.

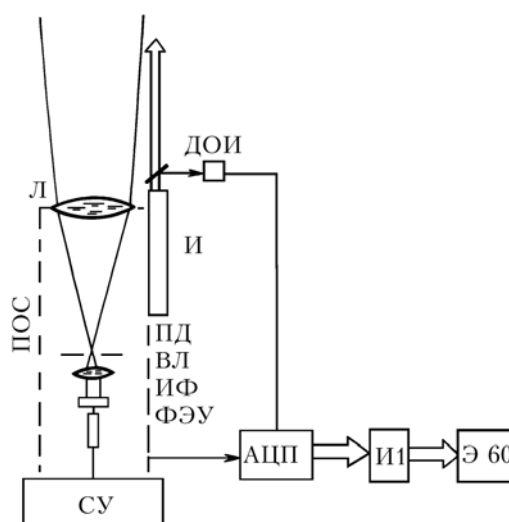


Рис. 1. Функциональная схема лидара «ЛИСА»

Источник светового излучения  $U$ , в качестве которого используется серийный лазер с усилителем, посылает в атмосферу короткие световые импульсы с длиной световой волны  $\lambda = 0,53$  мкм.

Отраженное из атмосферы излучение попадает на приемную оптическую систему  $ПОС$ , состоящую из объектива  $Л$  диаметром 30 см, сменной полевой диафрагмы  $ПД$ , вспомогательной линзы  $ВЛ$ , интерфильтра  $ИФ$  и узла фотоэлектронного умножителя  $ФЭУ$ , где преобразуется в электрический

аналоговый сигнал. С выхода ФЭУ сигнал поступает на вход 8-разрядного аналого-цифрового преобразователя, имеющего максимальную частоту дискретизации 15 МГц синхронизированного с работой лазера с помощью датчика опорных импульсов ДОИ. Цифровая информация с выхода АЦП через параллельный интерфейс И1 направляется в микро-ЭВМ «Электроника-60», где производится ее обработка.

Первичная обработка включает упаковку чисел и запись полученного массива данных на электронный диск с последующей перезаписью на долговременный носитель (ГМД или МЛ). Запись информации производится по 128 уровням, что соответствует максимальным высотам 1280 или 2560 м в зависимости от частоты дискретизации. Пространственное сканирование по трем фиксированным направлениям производится при помощи оригинального сканирующего устройства СУ [4] без вращения оптических элементов лидара.

Накопленные массивы данных в дальнейшем использовались для расчета скорости ветра.

Алгоритм определения скорости ветра состоит в следующем:

1. Распаковка исходных массивов данных и формирование 3-х временных массивов.  $A_{ijk}$ , где  $i$  – номер канала ( $i = 1 \dots 3$ ),  $j$  – высотный уровень ( $j = 1 \dots 128$ ),  $k$  – число «выстрелов» по данному каналу ( $k = 1 \dots 1024$ ).

2. Сглаживание полученных временных рядов при помощи низкочастотного фильтра Баттерворта [5].

3. Удаление тренда из временных последовательностей при помощи аппроксимации их полиномом четвертой степени.

4. Сглаживание концов временных рядов косинусным окном и получение в результате этих процедур исходных массивов для быстрого преобразования Фурье (БПФ)  $\tilde{A}_{ijk}$ .

5. Быстрое преобразование Фурье и получение спектральных оценок исходных рядов

$$S_{ijk} \Rightarrow F(\tilde{A}_{ijk}).$$

6. Получение оценок взаимной спектральной плотности для комбинаций  $i = 1$  и  $2$ ,  $1$  и  $3$ ,  $2$  и  $3$  (звездочка означает комплексное сопряжение)

$$\hat{S}_{12jk} = S_{1jk}^* S_{2jk};$$

$$\hat{S}_{13jk} = S_{1jk}^* S_{3jk};$$

$$\hat{S}_{23jk} = S_{2jk}^* S_{3jk}.$$

7. Проведение обратного БПФ и получение соответствующих корреляционных функций

$$R_{12jk} \Rightarrow F^{-1}(\hat{S}_{12jk});$$

$$R_{13jk} \Rightarrow F^{-1}(\hat{S}_{13jk});$$

$$R_{23jk} \Rightarrow F^{-1}(\hat{S}_{23jk}).$$

8. Нахождение максимумов взаимно-корреляционных функций и соответствующих им временных сдвигов  $\tau_{12}$ ,  $\tau_{13}$  и  $\tau_{23}$ .

9. Расчет скоростей и направлений ветра в исследуемом диапазоне высот.

Потенциал установки позволяет производить зондирование скорости ветра до 1,5–2 км в ночное время и до 1–1,5 км – в дневное.

Суммарное время измерений складывается из набора экспериментальных данных (22–25 мин) и обработки результатов. К сожалению, возможности микро-ЭВМ «Электроника-60» не позволяют производить обработку данных достаточно быстро, поэтому расчет параметров ветра на одном высотном уровне занимает около 2 мин. Таким образом, полная обработка данных занимает примерно 4,5 часа.

## Результаты измерений

Экспериментальные измерения параметров ветра, выполняемые в рамках комплексного эксперимента «SATOR-91» проводились в районе Академгородка г. Томска в периоды июнь–июль и октябрь–ноябрь 1991 г. Оптическая погода и период эксперимента соответствовала слабозамутненной атмосфере при метеорологической дальности видимости порядка 15 км. Измерения проводились как в дневное, так и в ночное время. При этом дневным условиям зондирования соответствовали, как правило, заниженные на 25–30% величины максимально достигаемых высот. Основные результаты, полученные в эксперименте, приведены в таблице.

Результаты измерения параметров ветра

Время местное	H, м								
	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
19 июня									
23:00	6,3	4,8	18	7,0	6,8	5,6	3,7	—	—
	105	154	102	81	69	69	77	—	—
24:00	6,1	5,4	13	6,8	7,2	6,1	4,0	—	—
	102	134	95	81	72	80	82	—	—
25 июня									
21:00	7,9	9,1	10,2	12,6	14,2	15,6	14,8	—	—
	220	226	228	217	232	261	207	—	—
22:30	9,2	9,6	10,3	8,9	11,6	13,2	14,0	17,1	—
	214	220	248	232	223	255	260	266	—
23:10	7,8	8,2	9,4	9,1	6,9	11,7	14,3	15,7	13,1
	210	214	250	233	223	250	260	260	270
00:26	8,0	8,5	9,1	9,6	11,5	13,4	14,8	15,6	15,1
	210	215	256	231	223	256	261	264	258
26 июня									
22:30	10,1	11,1	9,7	12,6	12,8	10,8	14,3	15,6	13,1
	234	244	242	221	198	262	224	244	232
00:30	8,6	8,9	9,6	10,1	11,7	8,9	12,6	13,8	12,1
	240	256	261	221	198	245	288	312	340
29 июня									
13:00	4,8	5,2	4,2	6,8	10,3	14,2	—	—	—
	240	256	298	320	307	289	—	—	—
15:00	4,7	5,3	6,8	7,3	9,1	12,5	—	—	—
	216	255	308	320	336	315	—	—	—
3 июля									
21:00	0,8	0,9	1,6	3,8	3,1	0,9	2,8	2,9	—
	240	256	299	320	240	286	288	296	—
23:10	0,9	1,0	1,5	5,1	0,8	0,7	0,9	1,1	2,7
	255	244	276	312	215	278	296	321	254
01:35	1,0	1,1	1,6	5,2	0,9	0,8	1,0	1,0	2,0
	254	236	256	199	264	239	278	287	300
5 июля									
2:50	4,2	3,1	3,6	3,7	3,5	4,8	—	—	—
	199	202	210	200	220	207	—	—	—
6 июля									
22:00	2,3	2,8	2,4	2,7	3,6	2,2	4,1	5,6	8,2
	186	196	208	220	261	299	271	256	264
23:27	2,2	2,7	3,8	3,9	4,7	7,6	5,2	7,0	9,0
	203	209	209	241	266	288	308	300	302
1:00	4,2	2,1	3,6	3,7	3,5	4,8	5,6	6,1	2,7
	199	202	210	200	220	207	224	254	281
3:20	0,8	2,9	3,2	2,7	3,5	4,5	5,1	5,8	6,2
	206	209	231	218	226	258	264	270	241
4:50	1,1	1,9	2,9	2,7	3,8	0,9	5,7	5,1	3,4
	178	204	245	214	209	176	221	245	260
9 октября									
16:00	2,8	3,4	3,2	5,1	7,4	—	—	—	—
	129	101	112	87	117	—	—	—	—
18:00	2,3	4,8	4,2	6,2	7,0	—	—	—	—
	161	138	102	97	63	—	—	—	—
16–17 октября									
21:35	4,9	6,8	7,3	5,1	9,8	11,6	10,4	12,6	—
	91	118	132	112	97	121	142	133	—
23:55	3,2	4,7	6,9	5,0	9,0	12,7	9,9	12,7	—
	111	132	123	116	132	156	137	132	—
November, 6									
10:15	3,9	4,8	7,8	8,8	7,6	9,9	—	—	—
	176	158	161	172	180	196	—	—	—
12:30	3,6	4,6	7,7	8,3	7,3	9,4	—	—	—
	170	182	163	158	143	144	—	—	—
15:40	3,8	4,4	7,5	8,1	7,2	9,0	—	—	—
	165	174	160	155	140	138	—	—	—
18:20	3,0	4,0	6,8	3,1	6,5	8,8	10,1	9,5	—
	196	199	224	211	246	218	197	190	—

Примечание.  $V$  — скорость ветра, м/с — верхняя строка.  $W$  — направление ветра (откуда дует), град — нижняя строка.

Как следует из анализа полученных данных, периоду измерений соответствовали невысокие значения скорости ветра, в основном слабоизменяющиеся с высотой. Основное направление ветра было юго-западным, то есть от центра города к Академгородку. Возможно, что это во многом определило оптическую ситуацию в районе измерений.

Совместно с лидаром измерения параметров ветра проводились также методом радиозондирования при помощи аэрологической станции «Метеор». Это дало возможность сопоставить данные, полученные двумя принципиально различными методами и оценить достоверность полученных данных. В качестве критерия достоверности использовался критерий Стьюдента [5], хорошо работающий при небольшом числе экспериментальных точек и устойчивый к систематическим смещениям. Анализ полученных результатов на основе данного критерия показал, что все высотные профили удовлетворяют критерию достоверности при уровне значимости не более 0,05.

На рис. 2–4 приведены профили измерений скорости ветра, выполненные при помощи лидара (сплошные линии) и «Метеора» (штриховые). Из рисунков видно, что данные, полученные различными методами, хорошо согласованы между собой, особенно до высот менее 1 км.

Представляет интерес поведение пространственно-временных характеристик аэрозольных неоднородностей. Исследование пространственно-временной структуры аэрозольных неоднородностей показало, что как форма, так и контраст аэрозольных неоднородностей существенно зависят от высоты зондирования, времени измерений и направления ветра. Так, при увеличении высоты наблюдалось небольшое уменьшение размеров неоднородностей, измеренных по ширине главного максимума автокорреляционных функций. Так, если на высоте 300 м наиболее характерным размером аэрозольных образований была величина 100–120 м, то для высоты 2000 м она уменьшалась до 70–90 м. Этот результат согласуется с данными, полученными нами при зондировании атмосферы с борта самолета [6].

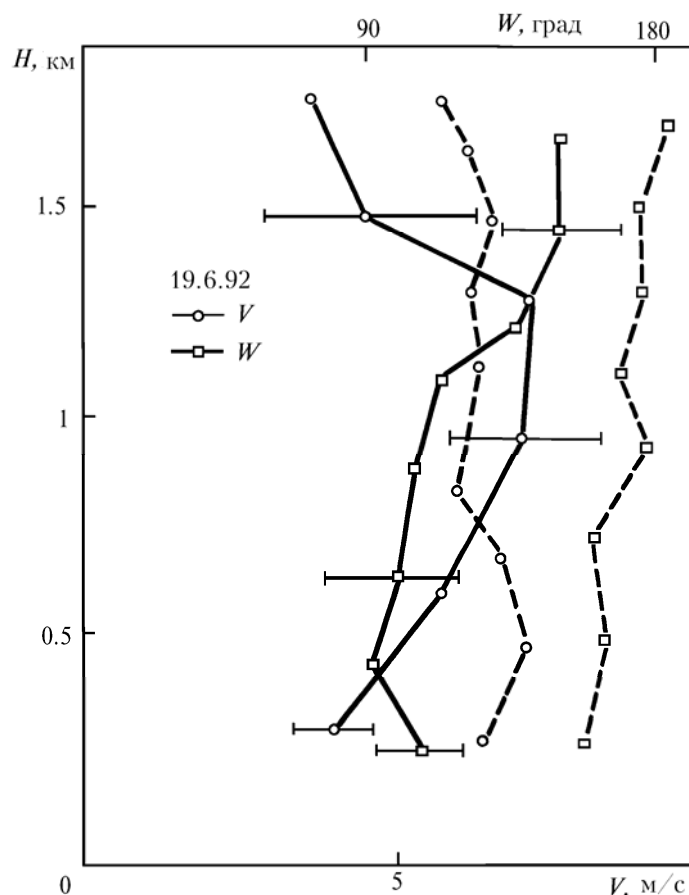


Рис. 2. Профили скорости  $V$  и направления  $W$  ветра, измеренные лидаром и «Метеором» 19.6.91 г. Горизонтальные отрезки характеризуют доверительный интервал для вероятности 0,9

Сопоставление измерений форм и размеров аэрозольных неоднородностей с ветровым режимом показало, что отличительными особенностями обладают неоднородности при направлениях ветра юго-юго-запад. Так как данное направление совпадает с расположением г. Томска, то можно сделать вывод о существенном отличии аэрозольных неоднородностей антропогенного происхождения от природных образований.

Основное отличие здесь связано с тем, что антропогенные аэрозольные образования обладают большим контрастом, характеризуемым отношением среднеквадратичного отношения к среднему зна-

чению. Так, если для природных аэрозолей наиболее характерным является диапазон величин 4–7%, то для индустриального аэрозоля контраст неоднородностей может достигать 15–20%. Специфична также и форма антропогенных аэрозольных образований, более вытянутая по направлению ветра, чем естественные неоднородности. Видимо, это связано с тем, что источники антропогенного аэрозоля чаще всего локальны. Подтверждением этому может служить тот факт, что в ночное время отличия в структуре аэрозольных неоднородностей гораздо менее значительны, чем в дневное, что связано с резким уменьшением индустриальной деятельности г. Томска.

Анализ погрешностей корреляционных измерений скорости ветра, проведенный в [3], показал, что суммарную погрешность измерений скорости ветра  $\sigma_{\Sigma}^{(V)}$  можно представить в виде

$$\sigma_{\Sigma}^{(V)} = (\sigma_m^{(V)2} + \sigma_E^{(V)2} + \sigma_{\Pi}^{(V)2} + \sigma_{\text{ш}}^{(V)2})^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_m$  – методическая погрешность корреляционных измерений, обусловленная статистической природой аэрозольных образований;  $\sigma_E$  – погрешность, обусловленная флуктуациями энергии лазера;  $\sigma_{\Pi}$  – погрешность за счет флуктуации прозрачности атмосферы и  $\sigma_{\text{ш}}$  – ошибка, определяемая квантовыми шумами оптического сигнала. Аналогичное выражение можно написать и для ошибки направления ветра  $\sigma_{\Sigma}^{(W)}$ .

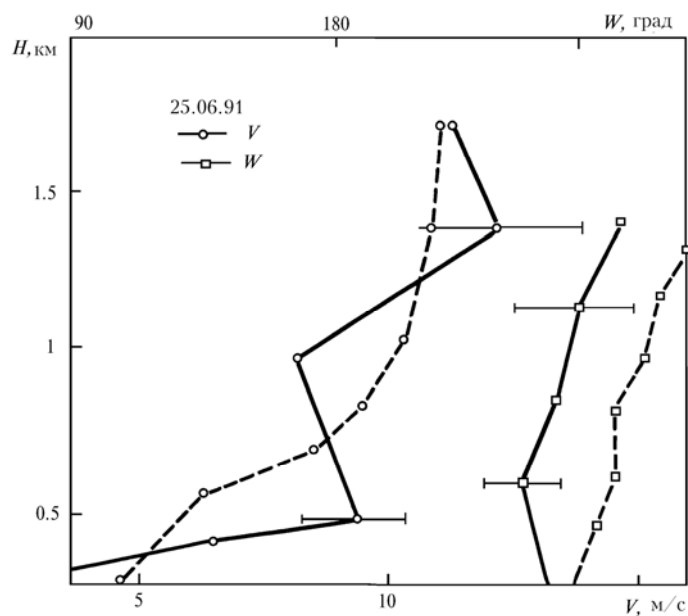


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для 25.6.91 г.

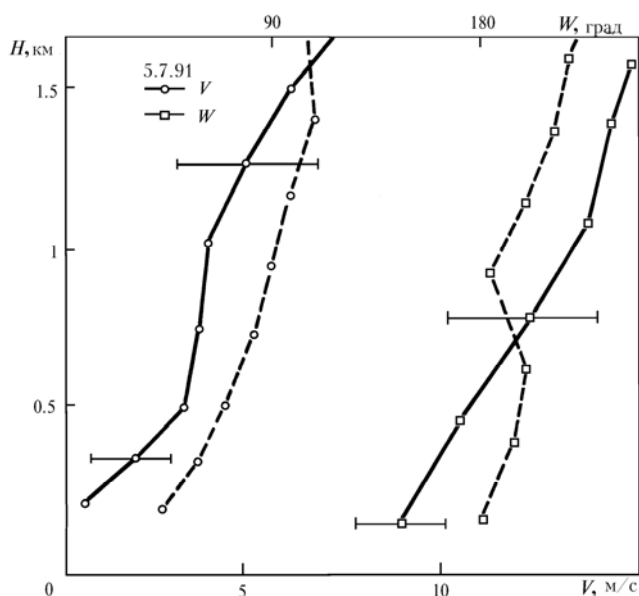


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но для 5.7.91 г.

Измерения скорости ветра показали, что в выражении (1) наиболее значимыми являются составляющие  $\sigma_m$  и  $\sigma_{ш}$ , суммарный вклад которых может достигать при неблагоприятных условиях зондирования (малая скорость ветра, сильная фоновая засветка и т.д.) величин порядка 20–25%. Вклад остальных слагаемых при данных условиях эксперимента не превышал 5%.

Таким образом, суммарная погрешность измерений параметров ветра не превышала 30% для всех диапазонов высот и условий зондирования.

1. Перов С. П., Хргиан А. Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометиздат, 1980. 384 с.
2. Глушенко Ю. В. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 3. С. 420.
3. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра/ Г.Г. Матвиенко, Г.О. Задде, Э.С. Фердинандов и др. Новосибирск: Наука, 1985. 224 с.
4. Применение корреляционных методов в атмосферной оптике/В.М. Орлов, Г.Г. Матвиенко, И.В. Самохвалов и др. Новосибирск: Наука, 1983. 160 с.
5. Прикладной анализ случайных данных /Дж. Бендат, А. Пирсол. М.: Мир, 1989. 540 с.
6. Белан Б.Д., Гришин А.И., Задде Г.О. и др. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Т. 17. № 11. С. 1148.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
27 мая 1992 г.

**A.I. Grishin, G.G. Matvienko. Lidar Studies of Wind Velocity Profiles in the Lower Atmosphere During «SATOR-91» Experiment.**

A systematic observations of wind velocity profiles in the lower atmosphere have been carried out during the summerfall period of 1991. Wind velocity measurements were performed remotely with a lidar based on correlation technique up to 1,5–2 km height. It is shown that wind velocity was not very high (less than 10 m/s) during the «SATOR-91» experiments and only slightly varied with height, with dominating southwest direction.