

Б.Д. Белан, В.Е. Зуев, М.В. Панченко

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ САМОЛЕТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АЭРОЗОЛЯ В ИОА СО РАН (1981 – 1991 гг.)

Приведен обзор основных результатов исследования атмосферного аэрозоля, полученных в ИОА СО РАН в период с 1981 по 1991 г. с помощью самолета-лаборатории. Представлены данные о его пространственно-временной изменчивости, микрофизике и составе. Дано описание некоторых атмосферных явлений, в которых аэрозоль играет ключевую роль. Приведены сведения об аэрозоле, имеющем антропогенную природу.

Возможность использования самолета для проведения измерений в атмосфере привлекала ученых с момента зарождения авиации. Началом самолетного зондирования атмосферы, по видимому, следует считать первый подъем метеорографа, осуществленный во Франкфурте-на-Майне в 1912 г. [1]. В России регулярное самолетное зондирование стали осуществлять в 1921 г., а несколько позднее в США, Франции, Норвегии, Швеции и других странах [2].

В настоящее время самолетное зондирование является одним из основных методов исследования атмосферы. Этому способствует тот факт, что современный самолет может поднимать на большую высоту многочисленные датчики и приборы, объединенные в единую информационно-измерительную систему, обеспечивать процесс измерения средствами программного, энергетического и метрологического обслуживания, иметь на борту необходимое количество экспериментаторов. Данные самолетного зондирования, вследствие того что самолет может проникать непосредственно в исследуемый объем пространства, обладают большой достоверностью. Достоинством метода является комплексность летных экспериментов: возможность проведения измерений большинства физических характеристик воздуха в системе единого времени, что облегчает нахождение взаимных связей между ними. Существенно также, что самолет-лаборатория (СМЛ) позволяет сопровождать изучаемое атмосферное явление на расстоянии в тысячи километров и тем самым следить за эволюцией его характеристик. Сейчас в мире созданы и используются десятки самолетов-лабораторий самого разного назначения от многоцелевых до специальных. Характеристики большинства из них приведены в обзоре [3].

Все вышеизложенное послужило основанием для внедрения в практику научно-исследовательских работ Института оптики атмосферы СО РАН самолетного метода изучения атмосферы. В середине 70-х годов самолетное зондирование в Институте носило эпизодический характер и было направлено в основном на разработку бортовых средств измерения параметров атмосферы и отработку методик зондирования характеристик воздуха и подстилающей поверхности. С 1981 г. зондирование приобрело регулярный характер, а с 1985 по 1988 г. было близко к мониторинговому режиму. Настоящая статья посвящена обобщению результатов, полученных в ходе самолетного исследования аэрозолей атмосферы за десятилетний период с 1981 по 1991 г.

1. Аппаратура и районы исследования

В период с 1981 по 1988 г. зондирование осуществлялось с помощью самолета-лаборатории Ил-14, описание которого имеется в [4]. Выполнялось оно в основном в фоновых районах и было посвящено исследованию атмосферного аэрозоля. В состав самолета-лаборатории входили измерительные комплексы: метеорологический и микрофизический [5], нефелометр ФАН со средствами термо- и гигрооптики [6], нефелометр внешнего объема [7], спектрофотометрический комплекс [8], бортовая система регистрации [9], несколько модификаций лидаров [10].

После окончания срока эксплуатации самолета Ил-14 комплекс научного оборудования был в 1988 г. перенесен на носитель Ан-30 без существенного изменения. Модернизация коснулась лишь блоков, которые требовали выхода за пределы планера, так как самолет Ан-30 отличается от Ил-14 герметичностью салона. По сравнению с Ил-14 самолет Ан-30 обладает

рядом достоинств. К ним относятся: большая высота подъема, грузоподъемность, энергооборуженность; наличие пяти фотолюков для ввода–вывода оптического излучения [3]. Самолет-лаборатория Ан-30 выполнял те же функции, что и Ил-14, и проработал до конца 1989 года.

Сложная экологическая обстановка, наблюдавшаяся во многих районах СССР, привела к необходимости переориентации в 1989 г. самолетной программы ИОА СО РАН, что потребовало доработки бортового комплекса аппаратуры. Созданный в результате дооборудования самолет-лаборатория получил название Ан-30 <Оптик-Э> (экологический). Его подробное описание, так же как и описание последующей модификации <Оптик-ЭМ>, приведено в [11]. С 1989 по 1991 г. самолет-лаборатория выполнял в основном экологическое обследование городов и территорий, включая работы по заказам муниципальных органов.

Чтобы не повторять здесь результаты, изложенные в [4–11], приведем основные характеристики измерительных комплексов, собранные в табл. 1, и их расположение в салоне и на планере последней модификации СМЛ (рис. 1). При этом отметим, что в табл. 1 даны сведения в основном по постоянно измеряемым величинам. Приборы и установки, периодически используемые на СМЛ, в табл. 1 не отражены.

Таблица 1

Характеристика научного оборудования, установленного на самолетах-лабораториях ИОА СО РАН

Система или прибор	Параметр	Диапазон	Погрешность	Примечание
Навигационная система	курс полета	0 ... 360°	2°	
	скорость воздушная	0 ... 600 км/ч	10 км/ч	
	скорость фактическая	0 ... 800 км/ч	10 км/ч	
	угол сноса	– 30 ... + 30°	2°	
	> крена	– 45 ... + 45°	2°	
	> тангажа	– 22 ... + 22°	1°	
	перегрузка	– 1,5 g... + 1,5 g	0,02 g	
	высота	0 ... 8100 м	20 м	
Метеосистема	температура	– 70 ... + 50 °С	0,5 °С	
	влажность	10 ... 100 %	7 %	
	давление	800 ... 200 мм рт.ст.	1 мм рт.ст.	
	скорость ветра	0 ... 300 км/ч	20 км/ч	
	направление	0 ... 360°	5°	
Термодинамический комплекс	флуктуации температуры и ветра по 3 координатам	0 ... 100 Гц		В стадии проверки
Фотоэлектрический счетчик АЗ-5	дисперсный состав	0 ... 300 см ⁻³ 0,4 ... 10 мкм	20 %	12 каналов
Диффузионная батарея ДСА	дисперсный состав	0 ... 1 000 см ⁻³ 3 ... 200 нм	20 %	8 каналов
Нефелометр ФАН с термо- и гидрооптикой	аэрозольное ослабление	0,001 ... 1 км ⁻¹	7 %	
		10 ... 400 °С	1 °С	
		10 ... 100 %	5 %	
Фильтровентиляционная установка	химический состав аэрозоля	10 ... 250 л/мин	5 %	Анализ в лаборатории
Озонометр ОЗ-П ГИАМ-15 ГИАМ-15 ИРФ-2	O ₃	1 ... 1000 мкг/м ³	10 %	
	СО	1 ... 100 ppm	5 %	
	СО ₂	10 ... 1000 ppm	10 %	
	гамма-фон	1 ... 1000 мкР/ч	20 %	
Лидар	глубина зондирования воды	2 ... 30 м	2,2 м	
	показатель ослабления воды	0,1 ... 0,5 м ⁻¹	20 %	
	концентрации аэрозоля	10 ... 1700 мкг/м ³	30 %	
Спектрофотометр	восходящее излучение	0,44 ... 1,62 мкм	20 %	8 каналов
Радиометр	радиационная температура	8,1 ... 14,8 мкм 250 ... 320 К	1 К	5 каналов
Тепловизор	>	– 20 ... 1600°С	1°С	

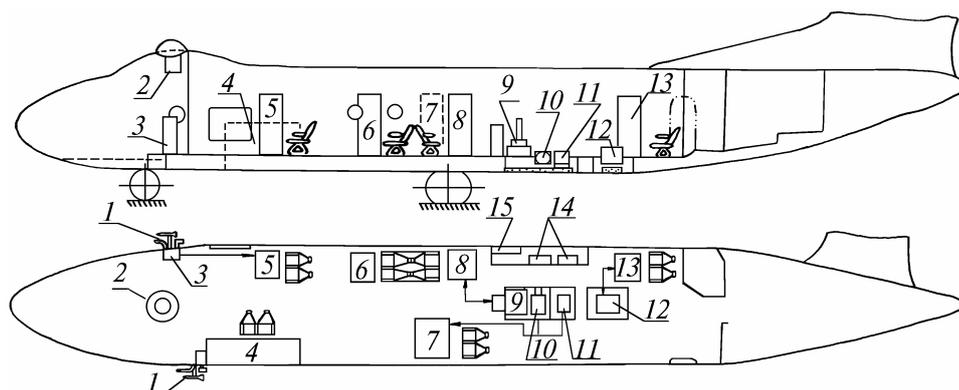


Рис. 1. Размещение оборудования на самолете-лаборатории Ан-30 <Оптик-Э>: 1 – блоки заборников воздуха и контактных датчиков; 2 – солнечный спектрофотометр; 3 – стойка для установки первичных преобразователей газоаналитического и аэрозольного комплексов; 4 – хроматограф; 5 – нефелометр со средствами термо- и гидрооптики; 6 – центральная ЭВМ; 7 – регистратор спектрофотометра; 8 – регистратор лидара; 9 – лидар; 10 – спектрофотометр; 11 – радиометр; 12 – тепловизор; 13 – регистратор тепловизора; 14 – щит бортоператора; 15 – навигационный комплекс

С помощью перечисленных самолетов-лабораторий в период с 1981 по 1991 г. проведено самолетное зондирование почти во всех физико-географических и административных регионах бывшего СССР. Это хорошо видно на карте, представленной на рис. 2. Естественно, что статистика полетов по разным частям этой карты различна. Так, например, для территории Западной Сибири, где расположен г. Томск – место базирования СМЛ, повторяемость зондирования наивысшая. В некоторых пунктах имеются только разовые профили. Более точно на этот вопрос отвечают данные табл. 2, которые дают представление по годам о регионах, в которых проводилось зондирование, а также об объемах летного времени и количестве отобранных проб воздуха для последующего их химического анализа.

Таблица 2

Регионы работы самолетов-лабораторий и объемы летного времени

Год	СМЛ	Западная Сибирь	Восточная Сибирь	ЕТС	Казахстан	Урал	Дальний Восток	Средняя Азия	Число проб воздуха	Количество часов
1981	Ил-14	+	+	-	+	-	-	-	108	130
1983	«	+	+	-	+	-	-	-	136	190
1984	«	+	+	+	+	+	-	+	121	420
1985	«	+	+	+	+	-	-	-	508	860
1986	«	+	+	+	+	-	+	+	470	1160
1987	«	+	+	+	+	+	-	+	670	1020
1988	«	+	+	+	+	+	-	+	249	320
	Ан-30	+	+	+	+	-	+	+	349	520
1989	«	+	+	+	+	+	+	+	563	420
1990	«	+	+	+	+	+	+	+	244	320
1991	«	+	+	-	-	+	+	+	356	145
1981-91	Ил-14	+	+	+	+	+	+	+	3774	5505
	Ан-30									

Кроме того, самолеты-лаборатории ИОА СО РАН приняли участие в комплексных экспериментах: <Вертикаль-86> и <Вертикаль-87> (Западная Сибирь), <ОдАэкс-87> (г. Одесса), Советско-американском пылевом эксперименте <Дюна-89> (г. Душанбе), провели комплексное обследование территорий полуострова Камчатка, Прибайкалья и оз. Байкал, Бурятии, месторождений Мегион и Самотлор, выполнили комплексную оценку состояния воздушного бассейна городов: Нижний Тагил, Нижневартовск, Павлодар, Усть-Каменогорск, Амурск, Хабаровск, Комсомольск-на-Амуре, Улан-Удэ, Кемерово.



Рис. 2. Районы работы самолетов-лабораторий ИОА СО РАН: • – пункты получения вертикальных профилей; ⊙ – города, в которых проведено комплексное экологическое зондирование; ≡ – то же для территорий; ◻ – экспедиционные работы и специальные эксперименты

2. Пространственно-временная изменчивость аэрозоля

Комплексы научного оборудования самолетов-лабораторий ИОА СО РАН позволили решать задачи самых разных масштабов в пространстве и времени: от флуктуационных (микромасштабных) вариаций до многолетних изменений, происходящих в атмосфере. Рассмотрим это на ряде примеров. Вначале обратимся к карте среднего многолетнего распределения взвешенных веществ над территорией бывшего СССР, полученной в ИОА СО РАН за период с 1981 по 1991 г. и представленной на рис. 3. Для ее построения использовались данные вертикального зондирования атмосферы, выполненные в разных географических районах. Осреднение концентрации проведено во времени. Измеряемый вертикальный слой изменялся от 0,1 до 8 км. Однако осреднение выполнено для диапазона высот 0 – 3 км, где сосредоточена основная масса аэрозоля. Из обработки исключены профили, полученные в зонах влияния промышленных центров.

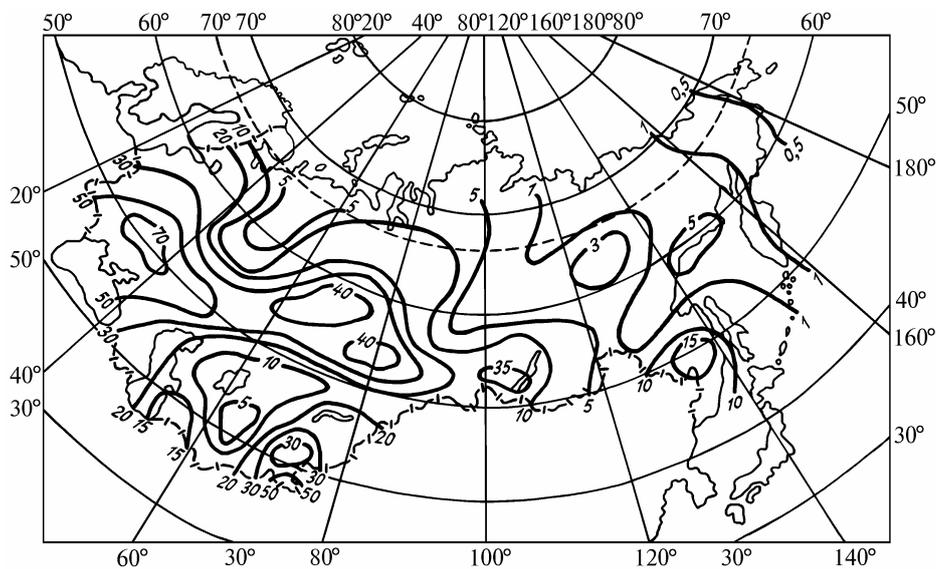


Рис. 3. Распределение счетной концентрации аэрозоля ($\bar{N} = \frac{1}{H} \int_0^H N(h) dh$) над территорией бывшего СССР

Из рис. 3 видно, что на рассматриваемой территории можно выделить несколько зон повышенного содержания взвешенных веществ в слое перемешивания. Главная из них распола-

гается над западными районами ЕТС и создается (с учетом западно-восточного переноса) сложением высоких фоновых концентраций аэрозоля, поступающего из Западной Европы, и выбросов Днепропетровско-Донецкой промышленной зоны.

Влияние этой зоны распространяется до южных районов Восточной Сибири. Правда, на него накладываеся усиливающее действие Уральской промышленной зоны и промышленных объектов, расположенных в Северном Казахстане и на юге Западной Сибири, что выражается в появлении еще двух региональных областей повышенных концентраций аэрозоля. Немного меньшей интенсивностью отличаются фоновые концентрации взвешенных частиц в зоне действия Иркутской промышленной зоны. Еще одна достаточно интенсивная область повышенной концентрации аэрозоля ($N = 50^{-3}$ см) выявляется над территорией Средне-азиатских республик. Ее появление можно объяснить влиянием пыльных бурь и застоём воздуха в долинах гор, где в основном расположены промышленные предприятия.

Несмотря на то что из обработки исключались все профили, измеренные в <шапках> промышленно развитых городов, рис. 3 демонстрирует, что антропогенная деятельность уже достигла такой интенсивности, что определяет региональный фон загрязнений.

Сам же региональный фон также может быть неоднородным, о чем можно судить по распределению аэрозоля над территорией Западной Сибири (рис. 4). Условия построения карты такие же, как и для рис. 3. Видно, что кроме отмеченных выше двух зон: Уральской и юга Западной Сибири, появляется еще одна – в районе Нижневартовска – Стрежеевой, которая создается выбросами веществ при сгорании сопутствующих газов в факелах месторождений. Вместе с тем в центре Западно-Сибирской низменности имеется узкая зона относительно низких концентраций аэрозоля ($N = 5$ см⁻³), которая является промежуточной между двумя источниками загрязнений, расположенными на севере и юге территории. Приведенное на рис. 4 среднее распределение, на наш взгляд, еще раз подчеркивает необходимость организации регионального мониторинга каждой территории.

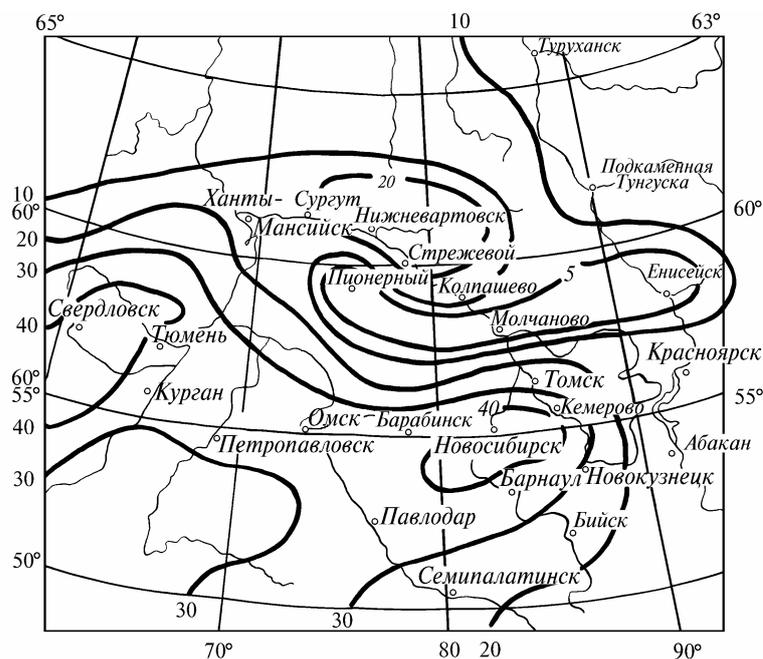


Рис. 4. Распределение счетной концентрации над Западной Сибирью

Показанная на рис. 3 и 4 региональная пространственная неоднородность распределения счетной концентрации аэрозоля проявляется и в других его характеристиках: химическом составе, распределении частиц по размерам и т.д.

На рис. 5 представлены сведения о средних концентрациях различных химических компонент в составе аэрозоля для трех регионов: Камчатки, Западной Сибири и Казахстана. Западная Сибирь и Казахстан выбраны потому, что для них накоплено наибольшее количество

проб – 867 и 642 соответственно. Камчатка же характеризуется наиболее низкой счетной концентрацией (рис. 3), что можно классифицировать как природный естественный аэрозоль. Число проб для этого региона составляет 167.

Анализ полученных результатов показывает, что аэрозольные частицы над Камчаткой имеют в основном два источника образования: морскую поверхность (Na^+ , K^+ , Cl^- , NH_4^+) и подстилающую поверхность суши полуострова (Fe , Mg , Al , Ca , Si).

Выше было показано (рис. 3 и 4), что Западная Сибирь, особенно ее юг, подвержены влиянию антропогенных выбросов местных источников и имеет высокий фон примесей, приносимых в системе западного переноса. Это находит отражение в резком увеличении концентрации таких компонент, как Cl^- и NO_3^- . Вместе с возрастанием общей концентрации увеличивается также и концентрация почвенной фракции.

Казахстан в этом смысле оказывается в промежуточном положении. В составе аэрозольных частиц, которые наблюдаются над его территорией, можно выделить все три фракции: морскую, почвенную и фотохимическую (антропогенную), что, по-видимому, обусловлено близостью Каспийского и Аральского морей и наличием на его территории крупных промышленных объектов. Резкое увеличение концентрации Si над данным регионом можно объяснить наличием обширных пустынь с песчаной поверхностью.

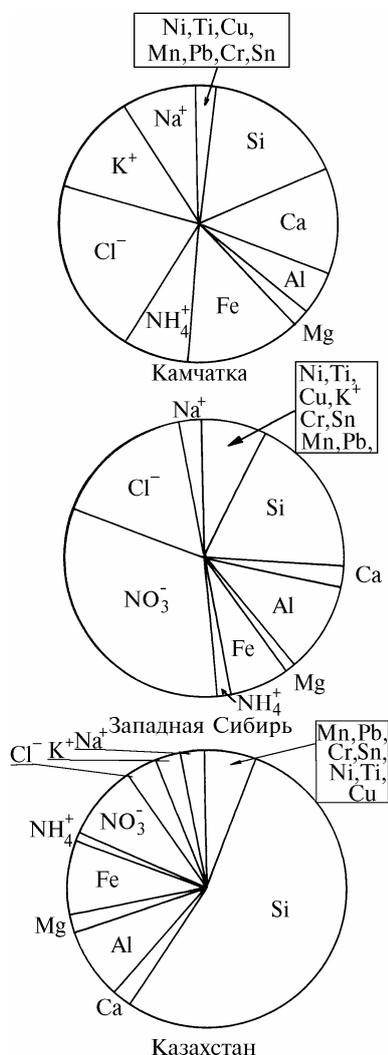


Рис. 5. Химический состав (%) аэрозоля над различными регионами

Для многих практических приложений важно знать не только фактическое распределение аэрозоля, но и его микромасштабные неоднородности и характер флуктуаций его концентра-

ции. Исследование статистических характеристик поля аэрозоля осуществлялось с помощью бортового комплекса самолета-лаборатории Ил-14 (воздушная скорость 70 м/с). Использовались компоненты комплекса, описанные в [4, 5, 7, 9]. Частота регистрации информации была следующей: опрос нефелометра – 10 Гц, опрос АЗ-5 и датчиков средних метеовеличин – 1 Гц, датчика флуктуаций температуры – 100 Гц. Обработка реализаций производилась по алгоритмам, которые обычно используются при анализе турбулентных характеристик атмосферы [12].

В ходе исследовательских полетов на разных высотах в различных регионах бывшего СССР были выявлены некоторые общие закономерности поведения корреляционных функций коэффициента обратного рассеяния β_π и счетной концентрации N аэрозолей, несущих информацию о пространственной структуре аэрозольных полей. Вид корреляционных функций R_β и R_N существенно зависит от высоты полета и диаметра d аэрозольных частиц, в то же время зависимость корреляционной функции R_β от длины волны λ в диапазоне 0,37–0,7 мкм проявляется слабо.

На рис. 6 приведены корреляционные функции коэффициента обратного рассеяния и счетной концентрации аэрозоля, полученные в одном из полетов в июне 1984 г. над Западной Сибирью. Видно, что пространственные радиусы корреляции, оцениваемые по уровню 0,5, составляют 7...15 м для коэффициента обратного рассеяния и 30...150 м для счетной концентрации. Из данных рис. 6 четко видна зависимость радиусов корреляции от высоты. Так, чем выше уровень, для которого рассчитана корреляционная функция, тем меньше масштабы аэрозольных неоднородностей. Для коэффициентов обратного рассеяния на высоте 400 м $L(R_\beta = 0,5) = 15$ м, а на высоте 3 200 м $L(0,5) = 7$ м. Та же тенденция видна и из данных о счетной концентрации аэрозоля: $H = 500$ м, $L(R_N = 0,5) = 120$ м; $H = 4 600$ м, $L(0,5) = 40$ м.

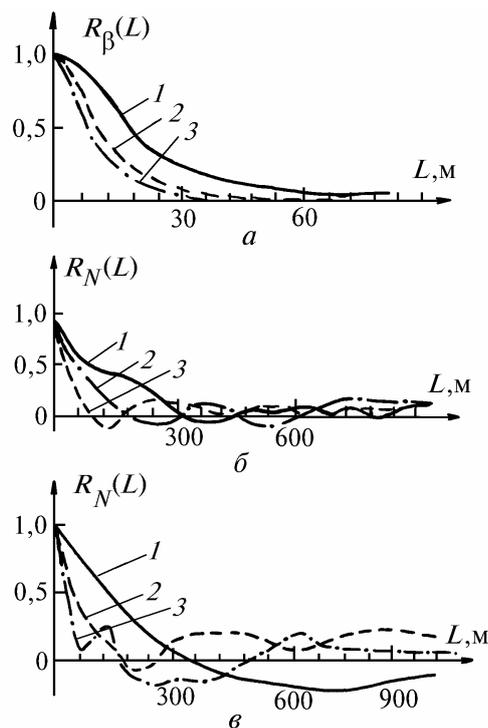


Рис. 6. Пространственные нормированные автокорреляционные функции: *a* – коэффициента обратного рассеяния ($\lambda = 0,7$ мкм) на высотах 400 (1), 1500 (2), 3200 м (3); *б* – счетная концентрация частиц $d \geq 0,4$ мкм на высотах 500 (1), 2600 (2) и 4600 м (3); *в* – на высоте 1500 м для частиц с $d \geq 0,4$ (1), 0,7 (2) и 1 мкм (3)

Аналогичные зависимости были отмечены для районов Казахстана, Урала и Восточной Сибири. Мало изменяются характерные масштабы аэрозольных неоднородностей и от величины счетной концентрации аэрозоля, которая в отдельные дни могла отличаться по своим значениям больше, чем на порядок. Уменьшение характерных размеров аэрозольных неоднород-

ностей с ростом высоты носит объективный характер, что подтверждается результатами, полученными разными методами.

Среди физических причин формирования высотной зависимости корреляционных функций можно указать на неполное увлечение аэрозольных частиц турбулентными вихрями [13]. При этом надо учитывать, что время релаксации по отношению к увлекающему ее потоку зависит не только от ее размера, но и от соотношения размера частицы и длины свободного пробега молекул воздуха. В условиях эксперимента, данные которого приведены на рис. 6, длина свободного пробега молекул воздуха увеличивалась с высотой максимум в 1,4 раза, что, однако, не объясняет полностью изменения радиусов корреляции аэрозоля с ростом высоты, приведенных на рисунке.

Другой возможной причиной уменьшения характерного масштаба неоднородностей при увеличении высоты может быть уменьшение коэффициента турбулентной диффузии воздуха. Оба указанных фактора могут действовать и одновременно. С целью выявления приоритетности рассматриваемых механизмов воздействия на аэрозоль были записаны реализации счетной концентрации аэрозоля для частиц разного размера и коэффициентов обратного рассеяния для различных длин волн в диапазоне от 0,37 до 0,7 мкм на фиксированных высотах. Результаты для флуктуации концентрации, полученные в одном из полетов над Казахстаном в декабре 1984 г., представлены на рис. 6, в, свидетельствуют об уменьшении размера аэрозольных неоднородностей при увеличении размера частиц. Это позволяет судить о приоритетности первой гипотезы, т.к. коэффициент турбулентной диффузии воздуха можно считать постоянным на заданной высоте. Для частиц $d > 0,4$ мкм масштаб неоднородностей по уровню $R_N(L) = 0,5$ составляет 140 м. Эта закономерность проявляется на всех высотах и также носит универсальный характер и подтверждается результатами, полученными над ЕТС, Западной Сибирью и Уралом, и прослеживается в реализациях счетной концентрации аэрозоля различных размеров, представленных в [14], авторы которой, однако не сделали соответствующих статистических обобщений.

Как известно [15], если рассматривать спектры флуктуаций основных метеорологических величин на большом частотном интервале, превышающем инерционный, то в них обнаруживается мезомасштабный минимум. Переход от инерционного интервала к мезомасштабному определяется внешним масштабом турбулентности. Длина реализаций, используемых в настоящей работе, недостаточна для того чтобы охватить такой большой интервал. Тем не менее излом кривых спектральной плотности, характеризующий переход от закона $\langle -5/3 \rangle$, на полученных спектрах флуктуаций коэффициента обратного рассеяния и счетной концентрации аэрозоля, имеется.

Из рис. 7 и 8 видно, что спектры флуктуаций коэффициента обратного рассеяния и концентрации аэрозоля, подчиняясь закону $\langle -5/3 \rangle$, в то же время, начиная с какого-то частотного интервала, терпят излом. Причем этот излом зависит от высоты. Если переходить к пространственным периодам, то оказывается (рис. 7), что $S_p(L)$ на высоте 500 м подчиняется закону $\langle -5/3 \rangle$ на интервале до 350 м. По мере увеличения высоты этот интервал сужается и на высоте 4600 м нижняя граница интервала становится равной 0,4 Гц или масштабу 175 м. Та же тенденция заметна и в кривых спектральной плотности флуктуаций счетной концентрации аэрозоля (рис. 8, кривые 1–3).

Обнаруженный факт значительного отличия внешних масштабов полей счетной концентрации и коэффициента обратного рассеяния может быть объяснен определяющим вкладом во флуктуации оптических сигналов крупных аэрозольных частиц, концентрация которых весьма мала. Рис. 8 (кривые 4–6) демонстрирует изменение интервала пространственных масштабов, на котором спектральная плотность флуктуаций счетной концентрации аэрозоля подчиняется закону $\langle -5/3 \rangle$ в зависимости от размера аэрозольных частиц. Видно, что, чем больше размер частиц аэрозоля, тем выше нижняя частота интервала выполнения закона $\langle -5/3 \rangle$. Так, если внешний масштаб для частиц $d > 1$ мкм составляет 1600 м (кривая 5), то для частиц $d > 4$ мкм L_0 равна 350 м (кривая 6).

Различия между получаемыми спектрами для других физико-географических районов сводятся лишь к вариациям величины внешнего масштаба L_0 , ограничивающего интервал закона $\langle -5/3 \rangle$. Можно предположить, что излом на кривых спектральной плотности характеризует наибольший размер вихрей, эффективно воздействующий на поле аэрозоля на данной высоте или на определенный размер частиц.

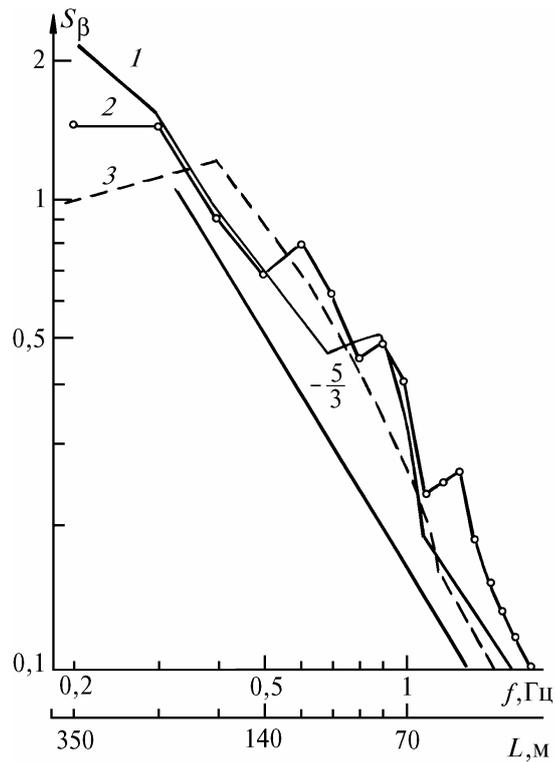


Рис. 7. Спектральная плотность флуктуаций коэффициента обратного рассеяния ($\lambda = 0,7$ мкм) на высотах 500 (1), 3000 (2) и 4600 (3) м

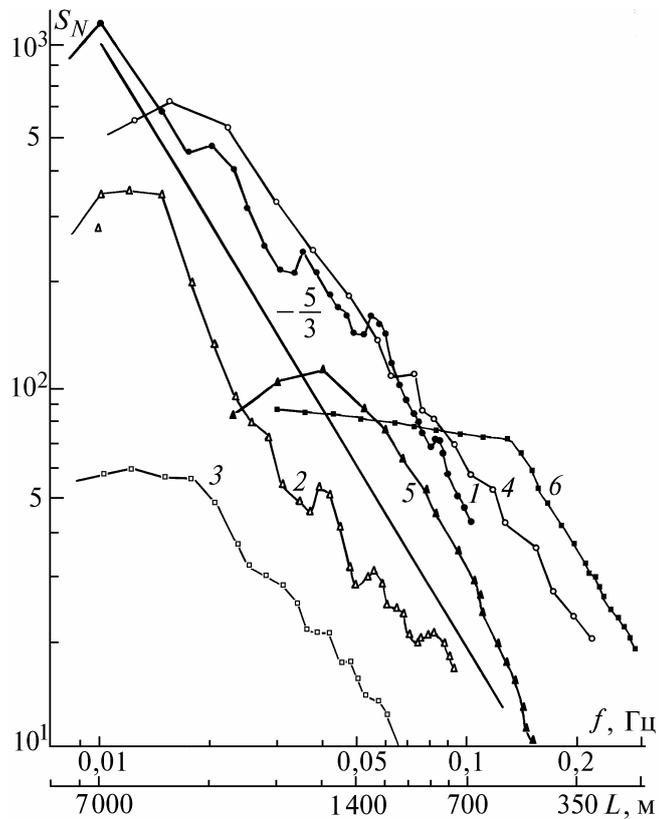


Рис. 8. Спектральная плотность флуктуаций счетной концентрации аэрозоля ($d \geq 0,4$ мкм) на высотах 500 (1), 2 000 (2), 4 500 м (3) и на высоте 2 500 м для частиц с $d \geq 0,4$ (4), 1,0 (5) и 4,0 мкм (6)

Таким образом, проведенное экспериментальное исследование корреляционных функций аэрозольных неоднородностей и спектров флуктуаций концентрации аэрозоля подтверждает справедливость основных положений теории и одновременно выделяет факты, которые не находят объяснения. К таким фактам относятся высотные изменения аэрозольных неоднородностей и спектров флуктуаций концентрации аэрозоля.

Одной из важнейших климатических характеристик атмосферных параметров является их временная изменчивость, которая определяется суточным и годовым ходом, межгодовыми процессами. Для атмосферного аэрозоля суточный ход задает темп генерации, накопления и стока частиц, обусловленный чередованием дня и ночи. Годовой ход определяет те же характеристики в зависимости от изменения инсоляции. В межгодовой изменчивости сказываются долговременные тренды, обусловленные перечисленными параметрами и макромасштабной циркуляцией, играющей роль обратной связи.

Исследование суточного и годового хода вертикального распределения аэрозоля показало, что в течение суток профили наиболее сильно изменяются в нижнем 500-метровом слое воздуха (внутреннем слое перемешивания [17]), где они, как правило, следуют за профилем температуры [18]. Годовой ход также отличается своеобразием. Так, максимум концентрации наблюдается обычно весной, а глубокий минимум – с сентября по декабрь, что определяется ходом фотохимических процессов [18].

Наиболее интересным результатом по временной динамике аэрозоля, на наш взгляд, является многолетний ход его вертикального распределения, который показан на рис. 9. Из этого рисунка видно, что концентрация аэрозоля над Западной Сибирью убывала до 1988 г., а затем началось ее увеличение, особенно резкое в 1991 году.

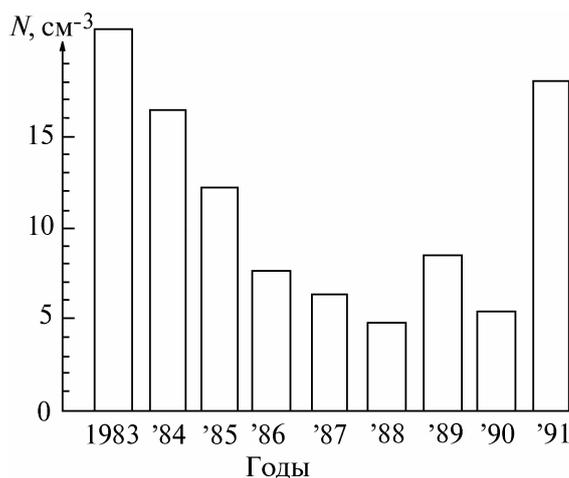


Рис. 9. Многолетний ход счетной концентрации аэрозоля над Западной Сибирью ($\bar{N} = \frac{1}{H} \int_0^H N(h) dh$)

В теории климата известен ряд колебаний метеовеличин с периодами, превышающими 1 год [15]. По своей форме диаграмма, изображенная на рис. 9, весьма напоминает 11-летний цикл. При этом, как известно, может меняться и характер атмосферной циркуляции. Анализ химического состава аэрозоля за рассматриваемый период показал, что снижение концентрации аэрозоля происходило за счет его минеральной фракции, особенно сильно за счет таких компонентов, как Al, Ca, Fe. Доля ионов Na^+ и K^+ за этот же период возросла. Это говорит о том, что на территорию Западной Сибири стало приходить меньше континентальных воздушных масс и больше морских, то есть изменилась циркуляция воздуха.

Подводя итог изложенному, отметим, что результатом многолетнего зондирования аэрозоля стала база данных, описание которой имеется в [19], и которая явилась основой для создания региональных микрофизических моделей аэрозоля, использованных для обоснования оптико-локационных моделей атмосферы Г.М. Крековым и Р.Ф. Рахимовым [20].

3. Исследование отдельных процессов и явлений

Регулярное самолетное зондирование, осуществлявшееся в 80-х годах, позволило не только накопить обширные массивы данных, но и провести исследование отдельных атмосферных процессов и явлений, ранее не описанных в литературе. Ограниченный объем статьи не дает возможности остановиться на всех результатах подробно, поэтому в начале приведем сводку основных из них.

Накопленный массив данных о вертикальном распределении аэрозоля позволил впервые изучить динамику слоя перемешивания и его внутреннего слоя [17], исследовать процессы накопления частиц в них [23]. В частности, показано, что внутренний слой перемешивания задерживает поступление аэрозоля в основном до тех пор, пока не произойдет окончательное заполнение частицами внутреннего.

Исследование <тонкой> стратификации аэрозоля в инверсионных условиях выявило образование слоев с повышенной его концентрацией толщиной в несколько десятков метров, которые совпадают с уровнями резкой смены градиентов температуры (как в положительную, так и в отрицательную сторону) и в которых имеется интенсивная турбулентность [22].

Сами же аэрозольные слои могут перемещаться как единое целое по вертикали, сохраняя свои параметры [23]. Направление и скорость их перемещения внутри однородной воздушной массы можно с высокой степенью точности оценить с помощью адиабатического метода расчета вертикальных движений [24].

В процессе зондирования микрофизических параметров пылевого слоя в эксперименте <Дюна> впервые получено их вертикальное распределение и показано, что внутри этого слоя происходит сток озона на частицах взвешенных веществ [25 – 27].

Исследование увлажнения аэрозоля в различных физико-географических условиях в свободной атмосфере показало, что оно не однозначно над разными регионами и зависит от химического состава частиц [28].

Экспериментальная проверка гипотез И.П.Мазина [29] о воздействии облаков на окружающее их аэрозольное поле показала, что облака действительно трансформируют спектр частиц в сторону их укрупнения [30].

Сопоставление данных о микрофизике аэрозоля с прямыми измерениями его оптических характеристик показало их тесную связь, которую можно выразить зависимостью [31]

$$\sigma_{\text{аэр}}(0,55) = 3,4 \cdot 10^{-2} N + 0,011,$$

где $\sigma_{\text{аэр}}(0,55)$ – объемный коэффициент рассеяния (км^{-1}) на $\lambda = 0,55$ мкм; N – концентрация частиц с $r \geq 0,2$ мкм, см^{-3} .

В ходе самолетного зондирования атмосферы было обнаружено два атмосферных явления, которые не описаны в литературе.

Одно из них заключается в наличии замкнутой циркуляции воздуха в котловине оз. Байкал, которая охватывает всю его акваторию по контуру. При этом над озером наблюдается основной поток западного направления. Детальное описание этого явления имеется в [32].

Второе явление заключается в образовании аэрозольных облаков при низких значениях относительной влажности. Это явление впервые было обнаружено в 1981 г. и его изучению посвящен ряд работ [33 – 37], поэтому здесь приведем его обобщенные характеристики.

Как известно, в случае отсутствия облаков аэрозоль выше пограничного слоя распределяется достаточно равномерно в атмосфере. По данным о коэффициенте обратного рассеяния [16,18] и счетной концентрации аэрозоля в его горизонтальном распределении удастся выделить неоднородности, не превышающие несколько сотен метров, либо крупномасштабные неоднородности в несколько тысяч километров [38]. В диапазоне от нескольких километров до нескольких сотен километров наблюдается так называемый мезомасштабный минимум флуктуаций коэффициента аэрозольного рассеяния, а соответственно и концентрации аэрозольных частиц.

Обнаруженные в ходе самолетного зондирования аэрозольные облака существенно отличаются от обычных водных, кристаллических облаков и от распределения аэрозоля в свободной атмосфере. Суть этого явления заключается в том, что в условиях ясной сухой атмосферы (относительная влажность воздуха менее 40%), на высотах более 1 000 м, как правило в надинверсионном слое, наблюдаются локализованные области с повышенной концентрацией частиц аэрозоля с горизонтальным масштабом от нескольких до десятков километров.

Вначале приведем сводку всех зарегистрированных на настоящий момент случаев появления аэрозольных неконденсационных облаков (табл. 3). Как следует из табл. 3, в период полетов был зарегистрирован 21 случай регистрации параметров неконденсационных аэрозольных облаков. Еще три облака зарегистрированы как факт. Основываясь на данных табл. 3, дадим их общее описание.

Т а б л и ц а 3

Характеристики аэрозольных неконденсационных облаков

Район, период	Время, ч, мин	Горизонт. размер, км	Высота, км	Температура воздуха, °С	Относит. влажность, %	$\frac{N_{обл}}{N_{ср}}$	Примечания
Западная Сибирь							
07.XII.1983	17.08–17.12	16	2,25	– 20,06	35	5	
14.XII.1983	15.40–17.10	9–6	1,84	– 16,4 ... – 17,0	16–22	4–9	
16.XII.1983	14.30–14.34	15	1,70	– 9,1	24	40	Поле из 11 облаков
20.XII.1983	16.55–16.58	12	1,45	– 12,7	16	20	
12.V.1984	22.56–23.45	20	1,2–1,8	+ 4,0 ... – 3,0	24–28	7,5	
15.V.1984	19.48–20.04	7–8	2,25	– 10,7 ... – 11,2	26–33	4–5	Поле из 2 облаков
20.IX.1985	15.15–15.32	12	1,10	+ 20,1 ... + 22,5	28–31	8	
18.XII.1986	22.58–23.21	20	2,60	– 24,0 ... – 25,6	22–35	3	
14.V.1987	17.17–17.43	21	2,80	+ 2,0 ... + 2,4	19–22	4	
Казахстан							
27.VI.1984	22.34–22.40	24	2,53	+ 7,0 ... + 7,5	30–36	5	
29.VI.1984	04.18–04.34	18	4,53	– 4,1 ... – 4,9	20–24	6	
29.VI.1984	20.57–22.00	8–14	3,40	+ 1,6 ... + 2,3	28–30	7–9	Поле из 6 облаков
10.IV.1985	07.10–07.48	35	2,70	– 9,2 ... – 9,7	22–24	4	
04.VI.1986	01.25–03.58	8–16	2,30	– 1,0 ... – 4,2	27–33	3–4	Поле из 6 облаков
Урал							
12.XII.1984	19.00–19.05	20	1,80	– 7,0 ... – 7,2	32–33	10	
12.XII.1984	21.05–21.10	20	1,80	– 6,7 ... – 7,2	27–31	6	
Средняя Азия:							
11.XII.1981	16.52–17.50	2–16	2,75	0,0 ... – 1,2	24–25	5–8	Поле из 8 облаков
05.II.1986	22.57–23.30	24(48)	2,70	– 5,5 ... – 6,2	50	65	Гигрометр не фиксирует влажность менее 50 %
Восточная Сибирь							
13.V.1984	19.00–19.58	10–12	2,40	– 12,7 ... – 13,0	36–39	5–8	Поле из 3 облаков
Забайкалье							
20.IX.1986	13.14–13.30	8	2,70	+ 0,2 ... + 1,0	46–49	5	
Дальний Восток							
26.IX.1986	13.58–14.12	10	3,00	– 0,4 ... 0,8	24–27	3	
Итого:		6 ... 35(48)	1,1...4,53	– 25,6...+ 27,5	16...39(49)	3...65	

Пр и м е ч а н и е. $N_{обл}/N_{ср}$ – отношение концентрации аэрозоля в облаке и в окружающей среде.

По времени суток частота появления аэрозольных неконденсационных облаков распределена неравномерно. Как правило, над большинством территорий они наблюдались во вторую половину дня и поздно вечером. Исключение составляет регион Казахстана, где зафиксирован один случай ночью и два случая в утренние часы.

Из данных табл. 3 также следует, что подобные образования могут наблюдаться над любыми регионами, где проходили полеты. Это свидетельствует о достаточно общей природе данного явления.

Горизонтальные размеры таких облаков изменяются в пределах от 6 до 35 км (в одном случае 48 км, но в облаке можно выделить сердцевину, имеющую размер 24 км). Среднее значение горизонтальной протяженности составляет в основном 8–20 км, что соизмеримо с облаками вертикального развития [39–40].

Высота, на которой регистрировались подобные образования, также может быть различной. Она изменяется от 1,1 до 4,5 км. Ниже 1,1 км они не регистрировались, что, возможно, связано с

тем, что внутри слоя перемешивания, где концентрация аэрозоля высока, облака не выделяются на общем фоне.

Диапазон температуры воздуха, при котором выявлены неконденсационные облака, весьма широк: от $-25,6$ до $+22,5^{\circ}\text{C}$, что еще раз подчеркивает универсальность обнаруженного явления.

Превышение счетной концентрации в облаке по отношению к окружающему воздуху изменяется от 3 до 65 раз. В среднем же оно бывает равно 5–8. Такие же соотношения характерны и для обычных водных облаков [41].

Неконденсационные облака могут наблюдаться как в виде отдельных облаков, так и в виде полей. Из 24-х зафиксированных случаев 6 приходятся на поля таких облаков. Наибольшее количество облаков, входивших в серию, равнялось 11.

Главной особенностью обнаруженных облаков в отличие от обычных водных или кристаллических является то, что они наблюдаются в условиях низких значений относительной влажности, как правило, $f < 40\%$.

При таких величинах относительной влажности, как известно [39–41], облака, в классическом их понятии, образовываться или длительно существовать не могут.

Важно отметить, что все случаи неконденсационных аэрозольных облаков были зафиксированы в удаленных от городской или промышленной местности районах, над слоем инверсии.

Вертикальная протяженность, по полученным к настоящему времени данным, может изменяться от 300 м до 3 км. Однако статистика по этому параметру мала, поскольку подобная атмосферная ситуация случается крайне редко (1 случай на 160 ч полета) и пока отсутствуют четкие критерии, ориентируясь на которые, можно было бы организовать специальные полеты. При обычных же полетах не имеется возможности смены направления полета на обратное для проведения многократных проходов через интересующую область пространства.

В качестве примера приведем вертикальный разрез аэрозольного неконденсационного облака, изображенный на рис. 10. Он получен в ходе самолетного зондирования 14 мая 1987 г., в период с 14 ч 20 мин до 19 ч 30 мин местного времени между населенными пунктами Колпашево и Каргасок Томской области. Здесь на рис. 10, *a* представлено распределение температуры, влажности и счетной концентрации аэрозоля $r > 0,2$ мкм; на рис. 10, *b* – распределение концентрации среднедисперсной ($r = 0,50 - 0,75$ мкм) фракции.

Из рис. 10, *a* видно, что неконденсационное облако находится над слоем инверсии и нарушения полей температуры и влажности в его зоне не наблюдается. Концентрация аэрозоля внутри облака распределена несимметрично. В нижней его части имеется область с повышенными ее значениями. Еще сильнее несимметричность выражена для отдельных фракций (рис. 10, *b*). Так, если субмикронная фракция ($r = 0,20 - 0,25$ мкм) повторяет в общих чертах распределение суммарной ($r \geq 0,20$ мкм) концентрации, то среднедисперсная ($r = 0,50 - 0,75$) локализована уже в меньшем объеме, а ядро с наибольшей ее концентрацией примыкает к слою инверсии.

Вертикальные разрезы аэрозольных неконденсационных облаков, представленные на рис. 10, показывают, что по внешнему проявлению они подобны обычным водным облакам вертикального развития типа C_u или C_b . Основное различие заключается в том, что неконденсационные облака наблюдаются в областях с низким ($< 40\%$) значением относительной влажности. Отсутствие конденсации, по-видимому, и является тем механизмом, который не вызывает деформации полей температуры и влажности в их зоне.

Если рассматривать распределение частиц аэрозоля по размерам в таких облаках и их химический состав, то можно выявить дополнительные различия, относящиеся не только к обычным облакам, но и к аэрозолю, находящемуся в окружающем облако воздухе.

Измерения распределения частиц аэрозоля по размерам в облаке и вне его показали, что в неконденсационном облаке происходит не простое увеличение концентрации всех фракций аэрозоля, а изменение их соотношения. При этом можно четко выделить вклад среднедисперсной фракции. Такая картина наблюдалась во всех 10 неконденсационных облаках, в которых проводились измерения с помощью параллельного анализатора распределения частиц по размерам. Различия заключались лишь в соотношении $N(r = 0,20 - 0,25 \text{ мкм}) / N(r = 0,5 - 1 \text{ мкм})$. В одних случаях это соотношение равнялось 0,4–0,5, в других достигало величины 1,5–1,6. Этот факт свидетельствует о том, что аэрозольные частицы среднедисперсного диапазона играют ключевую роль в генезисе неконденсационных облаков. Это подтверждается и данными регистрации коэффициента аэрозольного рассеяния ($\lambda = 0,55$ мкм), зафиксированными проточным

нефелометром и представленными в [36,37]. Увеличение коэффициента аэрозольного рассеяния при росте суммарной счетной концентрации сопровождается сильными флуктуациями сигнала, которые определяются в малом локальном объеме нефелометра ($\sim 0,5 \text{ см}^3$) большими частицами.

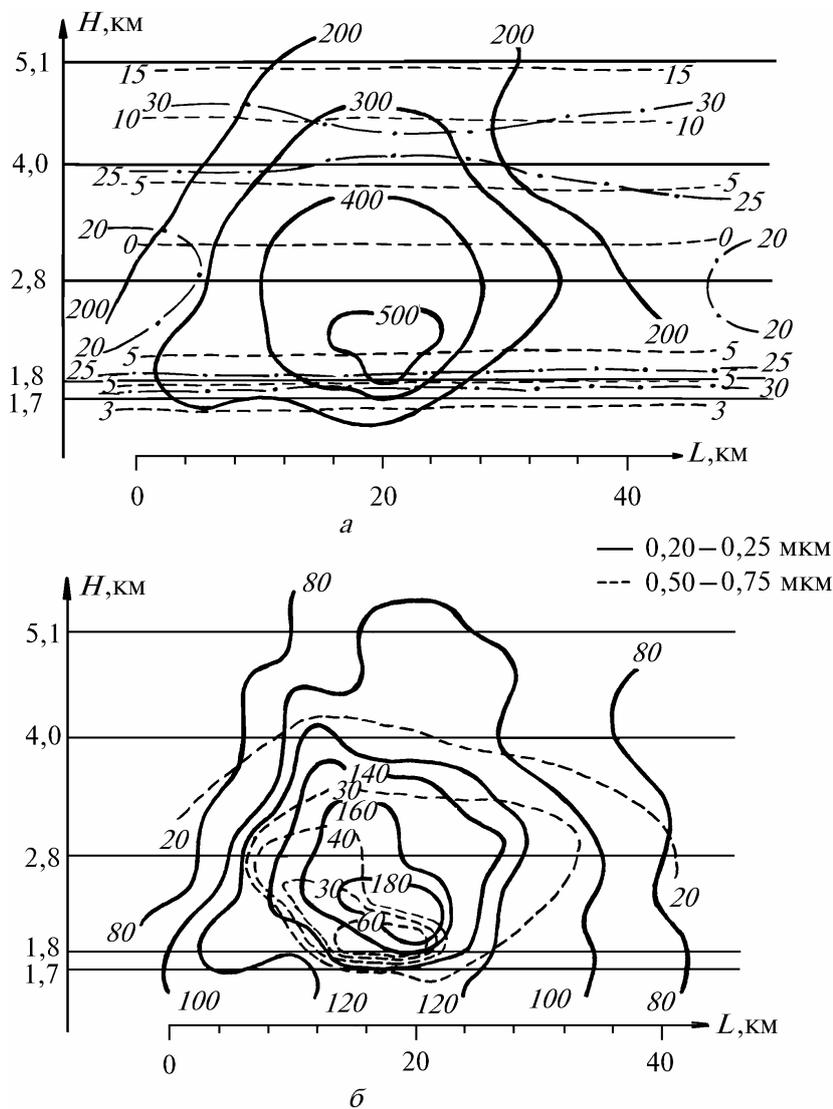


Рис. 10. Аэрозольное неконденсационное облако: а – распределение температуры (---), влажности (- · - · -), счетной концентрации аэрозоля (—); уровни полета самолета (—); б – распределение концентрации частиц: — $r = 0,20 - 0,25 \text{ мкм}$ и - - - - - $r = 0,50 - 0,75 \text{ мкм}$

Таблица 4

Химический состав аэрозоля (мкг/м^3) 5-6 февраля 1986 г. на высоте 2700 м над Средней Азией

№ строки	Время (местное)	Объем, м^3	Al	Ca	Si	Fe	Ni	Mg	Mn	Ti	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	NH_4^+	NO_3^-
1*	21-26	3,0	0,828	3,915	0,097	0,139	0,166	0,344	0,106	0,028	-	-	-	-	-	-
2**	23-20	0,3	23,888	22,387	1,116	2,144	1,569	3,156	0,581	0,263	-	-	-	-	-	-
3*	00-40	7,5	1,012	0,028	0,004	0,025	-	0,033	0,025	0,011	-	0,009	0,927	-	-	-

* Вне облака.

** В облаке.

Известно, что разные фракции аэрозоля существенно различаются по своему химическому составу [16]. Среднедисперсная и грубодисперсная фракции в основном состоят из веще-

ства, характерного для частиц почвы. Результаты определения химического состава аэрозоля в облаке и вне облака представлены в табл. 4. Видно, что в неконденсационном облаке происходит существенное увеличение концентрации элементов, характерных для почвы: Al, Ca, Si, Fe, Ni, Mg, Mn, Ti, а концентрация аэрозоля фотохимического происхождения, который характеризуется ионами SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- , Cl^- ниже порога обнаружения. Следует отметить, что нижний порог обнаружения этих ионов достаточно высок, хотя в большинстве проб, взятых ранее, эти ионы хорошо идентифицировались.

Исходя из изложенного, можно рассматривать два возможных механизма образования таких облаков. Первый заключается в прорыве через инверсионный слой перегретых локальных объемов воздуха. Второй – в переносе через инверсию также локальных объемов воздуха, обогащенных аэрозолем, обусловленным мезомасштабными вихрями, возникающими вблизи слоя инверсии в результате сдвиговой неустойчивости. В подтверждение первого механизма можно привести результаты лидарного зондирования аэрозоля, опубликованные в [42], в пользу второго – результаты, полученные во время пылевой бури в районе г. Душанбе [25,26].

4. Экологические исследования

С 1989 г. самолет-лаборатория Ан-30 <Оптик-Э> выполнял в основном работы, связанные с экологической тематикой. Следует отметить, что самолетное зондирование в экологических целях применяется часто [43–46], но без должного методического обоснования. Исключение составляет лишь проблема изучения трансграничного переноса, решение которой хорошо обосновано в [47].

При проведении исследований ограниченных территорий, городов и отдельных промышленных объектов зондирование проводилось, как правило, на интуитивном уровне. Поэтому при переходе к исследованию распределения и динамики городских загрязнений нам пришлось восполнить этот методический пробел. Были разработаны методики, позволяющие определять баланс веществ, поступающих в город извне, выбрасываемых на его территории и выходящих из города; картировать распределение примесей над городом (последнее делается с помощью наземного мобильного комплекса); измерять состав и рассчитывать объем выбросов отдельных крупных источников [48].

Так, для того чтобы определить баланс загрязнений в районе города, надо измерить их среднюю концентрацию по периметру на разных высотах, скорость и направление ветра. Балансовая оценка выполняется исходя из закона сохранения массы вещества в следующей форме:

$$B = \int_l \int_0^H C_i(l, h) V(l, h) \cos(\hat{V}, l) dl dh,$$

или

$$B = \oint_s C_i(s) V(s) \cos(\hat{V}, s) ds + \oint_s \int_0^H Q_i ds dh,$$

где l – координата вдоль периметра города; h – текущая высота над поверхностью земли; s – элемент площади; C_i – концентрация исследуемой примеси; V – модуль скорости ветра; $\cos(\hat{V}, l)$ – косинус угла между вектором ветра и границей участка; $\cos(\hat{V}, s)$ – то же, только между вектором ветра и элементом площади; Q_i – скорость образования i -примеси на территории города. Вторая формула является предпочтительней, так как позволяет оценить не только баланс по горизонтали, но и по вертикали (осаждение или генерацию).

Этот вид экологического обследования города реализуется по следующей схеме (рис. 11, а). В начале работы производится вертикальное зондирование атмосферы до максимальной высоты, как это показано в левой части рис. 11, а. Оно выполняется для определения температурной и ветровой стратификации, высоты слоя перемешивания, выделения особенностей в профилях загрязняющих веществ. Затем СМЛ переходит в режим горизонтального полета по квадрату или прямоугольнику, охватывающему весь город. Он выполняется с интервалом высот 100 м, начиная от минимально возможной в данной местности и кончая верхней границей слоя перемешивания. Концентрация примесей у поверхности земли определяется с

помощью мобильной станции. Помимо концентрации загрязнений в ходе полета фиксируются метеорологические величины и навигационные характеристики. Независимо от масштабов города этот вид обследования должен быть завершен в течение одного дня при устойчивой погоде с постоянным по времени и по высоте направлением ветра. Расчет баланса ведется по любой из приведенных выше формул. Суммарная ошибка определения баланса в зависимости от выбранного параметра, погодных условий, географических особенностей местности может изменяться от 35 до 60%. Величины балансов загрязнений, измеренные в районе некоторых городов СНГ, приведены в [48].

Следующим видом работ при экологическом обследовании города является картирование распределения воздушных и наземных примесей. Воздушное картирование осуществляется самолетом-лабораторией, приземное – с помощью мобильной станции. Схематически это изображено на рис. 11, б.

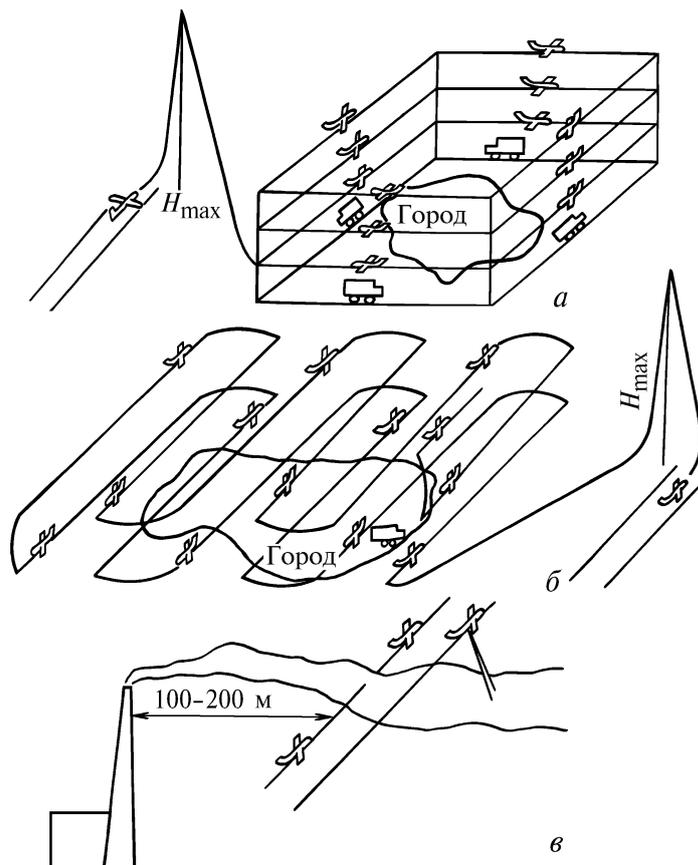


Рис. 11. Схемы экологического зондирования

В начале работы, так же как и при оценке балансов, выполняется вертикальное зондирование для определения термодинамической стратификации и профилей примесей. На основании полученных вертикальных распределений выбираются высоты, для которых будут строиться горизонтальные разрезы (площадки). Эти критерии общеизвестны [49], поэтому заострять вопрос на них не будем. Отметим только, что высоты для картирования не задаются заранее, а определяются в ходе полета. В этом виде зондирования предварительно выбираются направление и количество маршрутов, по которым будут проходить полеты СМЛ. Как правило, маршруты располагаются на равных удалениях друг от друга, что в последующем облегчает интерполяцию данных. В зависимости от размера города таких маршрутов на одной площадке может быть от 6 до 12. Число уровней изменяется от 3-х, при наличии низкой приземной инверсии, до 6 – в условиях летнего интенсивного перемешивания.

Данные, полученные в ходе этого вида зондирования, используются затем для построения карт распределения разных ингредиентов на каждом из уровней. Сопоставление таких карт

между собой позволяет составить картину объемного распределения загрязнений над городом, а их сравнение во времени – оценить динамику генерации и переноса примесей.

Ранее нами уже приводились примеры карт, которые демонстрировали особенности распределения загрязнений над разными городами [42,50,51]. Кроме этой функции, необходимой специалистам природоохранных органов, у таких карт имеется еще одно достоинство, позволяющее путем сравнения различных характеристик воздуха найти объяснение тем или иным особенностям полученных распределений. В качестве подтверждения сказанному, приведем рис. 12, на котором проведено сопоставление распределения счетной концентрации аэрозоля и траекторий воздушных потоков над г. Хабаровском.



Рис. 12. Распределение над г. Хабаровском счетной концентрации аэрозоля (————), линий тока (----->); (——) границы города

На рис. 12 видно, что в поле ветра над городом возникают круговые циркуляции, которые приводят к накоплению аэрозоля в них. Данным эффектом и можно объяснить маленькую величину баланса загрязнений в районе этого города, приведенную в [48].

Третьим видом зондирования при экологическом обследовании городов является определение характеристик выбросов из крупных источников, их состава и объема. Обычно состав и объем выбросов рассчитываются на основании технологий или определяются путем забора проб из отводящих труб. При этом физико-химические изменения, которые могут произойти в составе аэрозоле-газовой смеси при ее переносе по выводящей трубе и выходе в атмосферу, остаются за пределами учета.

Надо отметить, что работ в шлейфах выбросов на самолетах-лабораториях выполнялось достаточно много. Но они, как правило, имели частный характер и сводились к определению одного или нескольких ингредиентов выбросов, либо их динамики в шлейфе (см., например, [43–46, 52–53]). Целостного представления о широкой гамме веществ и об объеме выбросов такие измерения не дают. Соответствующее оснащение самолета-лаборатории Ан-30 <Оптик-Э> [1,11] позволяет существенно расширить сведения о характеристиках выбросов.

Зондирование выбросов крупных предприятий выполнялось по схеме, изображенной на рис. 11, в, либо прямым забором проб воздуха при пролете через шлейф, либо лазерным локатором при полете над шлейфом [54]. Отбор проб в шлейфах осуществлялся в непосредственной близости от труб на расстоянии 100–200 м от их среза. Высота и направление полета выдерживались так, чтобы СМЛ проходил через центр шлейфа, перпендикулярно ему. Экспозиция фильтров и контейнеров делалась только в шлейфе, остальные характеристики регистрировались непрерывно. Результаты подобных измерений опубликованы в [42,55].

Метеорологические и навигационные параметры, регистрируемые синхронно СМЛ Ан-30 <Оптик-Э> [11], позволяют не только определять состав выбросов, но и рассчитывать их объем по каждому объекту.

Зная параметры шлейфа: $V(s)$ – скорость ветра на высоте пересечения и $C_i(s)$ – среднюю концентрацию примеси в его сечении, можно определить количество вещества, выбрасываемого в единицу времени:

$$Q = \iint_s C_i(s) V(s) ds.$$

Суммарная погрешность определения объема выбросов по этой методике не превышает по оценкам 35%.

Не приводя данных по объемам выбросов различными объектами, укажем, что сравнение результатов их определения по данной методике с расчетами по технологиям могут изменяться от 0,95 до 10 раз. Причины этих расхождений подробно обсуждались в [48], поэтому останавливаться на них не будем.

Реализация описанной здесь методики экологического обследования городов позволяет получить огромный фактический материал, который трудно охватить в одной статье. К настоящему времени опубликована лишь малая его часть. Для эффективного использования полученного массива экологической информации создана база данных [56], которая включена в перечень Информационного центра Национального комитета РАН по Международной гео-сферно-биосферной программе.

Заключение

В настоящий обзор включены результаты, которые получены по самолетной программе ИОА СО РАН только по одному направлению – исследованию свойств атмосферного аэрозоля. В нем не нашли освещения сведения о газовом составе воздуха и выбросов предприятий, данные лидарного зондирования и спектрофотометрирования параметров атмосферы и характеристик подстилающей поверхности, что требует отдельного, не менее обширного рассмотрения.

Авторы считают приятным долгом выразить признательность всему коллективу сотрудников самолета-лаборатории, а также летному и наземному составу Новосибирского авиапредприятия, которые своим трудом обеспечили получение этих результатов. В заключение укажем, что настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Госдепартамента США (грант R 25).

1. Хргиан А. Х. Очерки развития метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1948. 349 с.
2. Зайцев А. С., Ледохович А. А. Приборы и методы исследования облаков с самолета. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 175 с.
3. Белан Б. Д. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 1. С. 5–32.
4. Белан Б. Д. // Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы. Томск: ТФ СО РАН СССР, 1987. С. 34–40.
5. Ковалевский В. К., Толмачев Г. Н. // Там же. С. 40–46.
6. Панченко М. В., Тумаков А. Г., Терпугова С. А. // Там же. С. 40–46.
7. Гришин А. И., Матвиенко Г. Г. // Там же. С. 47–53.
8. Волков А. Н., Кабанов Д. М., Сакерин С. М. и др. // Там же. С. 71–81.
9. Беспалов А. С., Громаков Е. И., Покровский Е. В. и др. // Там же. С. 59–71.
10. Абрамочкин А. М., Занин В. В., Пеннер И. Э. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 2. С. 92–96.
11. Зуев В. Е., Белан Б. Д., Кабанов Д. М. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 10. С. 1012–1021.
12. Винниченко Н. К., Пинус Н. З., Шметер С. М., Шур Г. Н. Турбулентность в свободной атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 187 с.
13. Павлов В. В. // Метеорология и гидрология. 1985. N 3. С. 63–68.

14. Graedel T.E., Franey J.P. // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79. N 36. P. 5643–5645.
15. Мошин А. С. Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 184 с.
16. Белан Б. Д., Гришин А. И., Задде Г. О., Матвиенко Г. Г. // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1987. Т. 23. N 4. С. 402–408.
17. Белан Б. Д. // *Оптика атмосферы и океана.* 1994. Т. 7. N 8. С. 33–42.
18. Белан Б. Д., Гришин А. И., Матвиенко Г. Г., Самохвалов И. В. *Пространственная изменчивость характеристик атмосферы аэрозоля.* Новосибирск: Наука, 1989. 152 с.
19. Белан Б. Д., Лукьянов О. Ю., Микушев М. К. и др. // *Оптика атмосферы и океана.* 1992. Т. 5. N 10. С. 1081–1087.
20. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. *Оптические модели атмосферного аэрозоля.* Томск: ТФ СО АН СССР, 1986. 159 с.
21. Белан Б. Д., Задде Г. О., Пхалагов Ю. А., Рассказчикова Т. М. // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1987. Т. 23. N 6. С. 622–628.
22. Белан Б. Д., Покровский Е. В., Токарев В. В. // *Материалы XII Совещания по актинометрии.* Иркутск, 1984. С. 200–203.
23. Белан Б. Д., Задде Г. О., Панченко М. В. и др. // *Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Трансформация и дальний перенос газовых и аэрозольных примесей в атмосфере».* Вильнюс, 1986. С. 112–113.
24. Белан Б. Д., Задде Г. О., Панченко М. В. и др. // *Труды XI Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы.* 1987. Ч. 1. С. 125–129.
25. Белан Б. Д., Кабанов Д. М., Панченко М. В. и др. // *Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля.* Л.: Гидрометеоздат, 1992. С. 26–38.
26. Андропова А. В., Белан Б. Д., Джиллетт Д. А. и др. // *Изв. АН СССР, Сер. ФАО.* 1992. Т. 28. N 8. С. 798–804.
27. Sviridenkov M.A., Gillette D.A., Isakov A.A. et al. // *Atmos. Environ.* 1993. V. 270A. N 16. P. 2481–2487.
28. Белан Б. Д., Задде Г. О., Панченко М. В. и др. // *Оптика атмосферы.* 1989. Т. 2. N 8. С. 800–805.
29. Мазин И. П. // *Метеорология и гидрология.* 1982. N 1. С. 54–61.
30. Белан Б. Д., Задде Г. О., Рассказчикова Т. М. // *Метеорология и гидрология.* 1987. N 4. С. 38–46.
31. Белан Б. Д., Панченко М. В., Рассказчикова Т. М., Полькин В. В. // *Труды IX Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы.* Томск, 1987. Ч. 1. С. 130–133.
32. Зуев В. Е., Антонович В. В., Белан Б. Д. и др. // *Доклады РАН.* 1992. Т. 325. N 6. С. 1146–1150.
33. Белан Б. Д., Задде Г. О. // *Доклады АН СССР.* 1986. Т. 290. N 6. С. 3128–3131.
34. Белан Б. Д., Задде Г. О., Ковалевский В. К. и др. // *Оптика атмосферы.* 1988. Т. 1. N 6. С. 67–77.
35. Белан Б. Д., Задде Г. О., Панченко М. В. и др. // *Метеорология и гидрология.* 1988. N 8. С. 39–48.
36. Зуев В. Е., Белан Б. Д., Задде Г. О. и др. // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1988. Т. 24. N 9. С. 967–972.
37. Зуев В. Е., Белан Б. Д., Веретенников В. В. и др. // *Оптика атмосферы.* 1989. Т. 2. N 7. С. 737–743.
38. Зуев В. Е., Белан Б. Д., Задде Г. О. *Оптическая погода.* Новосибирск: Наука, 1990. 192 с.
39. Шмeтер С. М. *Термодинамика и физика конвективных облаков.* Л.: Гидрометеоздат, 1987. 288 с.
40. Дубровина Л. С. *Облака и осадки по данным самолетного зондирования.* Л.: Гидрометеоздат, 1983. 216 с.
41. Мазин И. П., Шмeтер С. М. *Облака, строение и физика образования.* Л.: Гидрометеоздат, 1983. 280 с.
42. Белан Б. Д., Бурков В. В., Панченко М. В. и др. // *Оптика атмосферы.* 1992. Т. 5. N 2. С. 186–192.
43. Despres A., Rancillac F. // *Pollut. Atmosph.* 1987. N 7–9. P. 226–236.
44. Дячук В. А., Раменский Л. А. // *Труды УкрНИИГМИ.* 1991. Вып. 241. С. 3–10.
45. Волков Э. П. *Контроль загазованности выбросами ТЭС.* М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
46. Tanaka M., Nakazawa T., Aoki S., Ohshima H. // *Tellus.* 1988. B40. N 1. P. 16–22.
47. Израэль Ю. А., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. и др. *Мониторинг трансграничного переноса загрязняющих воздух веществ.* Л.: Гидрометеоздат, 1987. 303 с.
48. Белан Б. Д. // *Оптика атмосферы и океана.* 1993. Т. 6. N 2. С. 205–222.
49. Владимиров А. М., Ляхин Ю. И., Матвеев Л. Г., Орлов В. Г. *Охрана окружающей среды.* Л.: Гидрометеоздат, 1991. 424 с.
50. Зуев В. Е., Белан Б. Д., Задде Г. О., и др. // *Оптика атмосферы.* 1989. Т. 2. N 6. С. 636–641.
51. Белан Б. Д., Микушев М. К., Панченко М. В. и др. // *Там же.* 1991. Т. 4. N 9. С. 995–1005.
52. Болтнева Л. И., Брюханов П. А., Назаров И. М. и др. // *Труды ИПГ.* 1988. Вып. 71. С. 143–149.
53. Абрамовский Б. // *Проблемы фоновый мониторинга состояния природной среды.* 1986. Вып. 4. С. 181–193.
54. Зуев В. Е., Кауль Б. В., Самохвалов И. В. и др. *Лазерное зондирование промышленных аэрозолей.* Новосибирск: Наука, 1986. 108 с.
55. Белан Б. Д., Вавер В. И., Ковалевский В. К. и др. // *Оптика атмосферы и океана.* 1993. Т. 6. N 5. С. 559–592.
56. Белан Б. Д., Лиготский А. В., Лукьянов О. Ю. и др. // *Там же.* 1994. Т. 7. N 8. С. 9–16.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
14 июля 1994 г.

B.D. Belan, V.E. Zuev, M.V. Panchenko. Main Results of Airborne Aerosol Sounding Conducted at the Institute of Atmospheric Optics SB RAS from 1981 to 1991.

A review of main results of atmospheric aerosol study obtained at the IAO since 1981 by means of airborne laboratory is presented in the paper. Data on the aerosol temporal-spatial variability, microphysics, and content are given as well as a description of some atmospheric phenomena, where the aerosol plays the leading role. An information on aerosol of anthropogenic origin is also given.