

РАССЕЯНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРНЫМ АЭРОЗОЛЕМ

УДК 551.521

В.У. Хаттатов, А.Е. Тяботов, А.П. Алексеев, А.А. Постнов

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛИДАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОЗОЛЯ В СВОБОДНОЙ ТРОПОСФЕРЕ АРКТИКИ

Представлены результаты исследований тропосферного аэрозоля в районах Арктики. Получены данные о пространственном распределении арктической дымки в северных регионах России, Атлантики и Канады. Исследование дымки производилось с помощью лидара с борта СМЛ ИЛ-18 <Циклон>. Приведены данные о распределении по высоте и в горизонтальных направлениях коэффициента рассеяния, который характеризует оптическую плотность тропосферного аэрозоля, в том числе и арктической дымки. Обнаружено, что значения коэффициентов рассеяния для арктической дымки в различных регионах Арктики отличаются между собой незначительно. Однако значения этой характеристики, полученные в одном и том же регионе в летнее время, когда дымка отсутствует, в 2–3 раза меньше, чем при наличии дымки.

1. Введение

Исследование радиационного баланса и процессов, определяющих его, в Арктике было начато в 70-х гг. в рамках ряда национальных и международных программ. Накопленные к середине 80-х гг. данные этих и других наблюдений, в частности результаты самолетных исследований, показали, что значительное влияние на перенос радиации оказывает так называемая арктическая дымка – скопление аэрозолей в атмосфере Арктического бассейна [1 – 6].

Считается, что аэрозоли выносятся из умеренных широт либо образуются за счет химических реакций из газов промышленного происхождения. Периодом наиболее длительного присутствия дымки в приземных слоях воздуха является зима и весна, что связывают со слабым осаждением аэрозолей из-за большой статической устойчивости воздуха и малого количества облаков и осадков, а также более интенсивной (по сравнению с летним периодом) меридиональной циркуляцией атмосферы [1, 3]. Специальные самолетные измерения, выполненные в 80-х гг. в Североамериканском и частично Атлантическом секторах Арктики, показали что основная масса аэрозоля содержится в нижней тропосфере (до высоты 1,5–2 км), а на больших высотах отмечаются отдельные слои толщиной от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Эпизоды с большой концентрацией аэрозолей – интенсивной арктической дымкой – отмечались при быстром выносе воздушных масс в Арктику из какого-либо индустриального района умеренных широт [1, 6]. В то же время единичные самолетные измерения в Российском секторе Арктики указывают на то, что аэрозольные скопления могут наблюдаться и в воздушных массах, которые довольно длительное время (более 6–8 дней) находились в пределах Арктического бассейна и не имели контакта с источниками аэрозолей и порождающих их газов [7].

В целом количества экспериментальных данных об арктической дымке и, в частности, об ее оптических параметрах явно недостаточно для проверки гипотетических механизмов ее образования.

В марте–апреле 1994 г. были проведены совместные российско-германские самолетные исследования аэрозольного и газового состава и оптических характеристик нижней и средней тропосферы Арктики с одновременным измерением метеорологических параметров. С германской стороны в летних исследованиях приняли участие сотрудники Института физики атмосферы Университета г. Майнц и метеорологической обсерватории г. Линденберга.

В отличие от предыдущих самолетных исследований, носящих региональный характер [2, 5, 7], в ходе российско-германской самолетной экспедиции удалось собрать данные об оптических и метеорологических характеристиках атмосферы (в слое 0,15–8,8 км) в трех секторах Арктики – Российском, Атлантическом и Североамериканском.

В настоящей статье рассмотрены вертикальные профили коэффициентов рассеяния света σ по данным лидарных измерений в 9 районах различных секторов Арктики. Сопоставлены

зимние и летние значения σ , усредненные в километровых слоях. На основе этих данных проанализирована применимость существующей гипотезы о происхождении арктической дымки.

2. Аппаратура, методика измерений и характеристика данных

Для исследования атмосферного аэрозоля с борта самолета использовался лидар-поляриметр, описание которого приведено в [8]. Там же дан анализ ошибок измерений. Ошибки определения индивидуальных значений σ и коэффициента поляризации δ в данном эксперименте составляли соответственно 22 и 9%.

Зондирование атмосферы производилось с борта самолета по вертикали вниз либо вверх, а также в горизонтальном направлении на длине волны 0,53 мкм.

Регистрация и обработка информации осуществлялись вдоль трассы зондирования через 10–20 м с помощью автоматизированной системы с использованием компьютера РС-АТ 386.

Методика самолетных измерений сочетала в себе вертикальную зондировку атмосферы на высотах от 0,15 до 8,5 – 8,8 км для определения вертикальных профилей характеристик и полета вдоль 3-х – 4-х горизонтальных измерительных участков длиной 50–150 км, расположенных в слоях с локальными максимумами концентрации аэрозоля.

Так как нас интересовал коэффициент рассеяния света за счет аэрозольной дымки, важно было исключить влияние ледяных кристаллов. С этой целью обрабатывались только те измерения σ , при которых коэффициент деполяризации света был равен нулю или не превышал 0,1.

3. Метеорологические условия переноса примесей

В период исследований в Канадском секторе Арктики перенос воздушных масс в районы измерений происходил из более северных или западных регионов, тогда как в Российском и Атлантическом секторах Арктики воздух поступал из более южных широт. Во всех случаях, кроме 31.03.1994 г., поступавший в район измерений воздух в течение предыдущих по крайней мере 2–7 дней не проходил над индустриальными районами и, следовательно, не подвергался загрязнению ни первичными аэрозолями, ни газами, трансформирующимися во вторичные аэрозоли. При этом воздух перемещался над Центральной Арктикой, полностью покрытой льдом, либо над заснеженной поверхностью континентов – Азиатского и Североамериканского. Это приводило к сильному выхолаживанию и формированию глубоких инверсий, препятствующих турбулентному перемешиванию загрязнений, поступающих в атмосферу.

Вынос воздушных масс в район, где проводились измерения 31.03.94 г., осуществлялся с востока Атлантического океана через Норвегию, о. Шпицберген к северной оконечности Гренландии. В этом случае в отличие от других воздушная масса предварительно прошла районы со сравнительно интенсивными источниками SO_2 и особенно NO_2 в Норвегии, а затем над незамерзшим океаном, где турбулентное перемешивание было сравнительно сильным и, следовательно, вертикальный профиль примеси мог стать более однородным.

4. Пространственное распределение и межсезонная изменчивость коэффициентов рассеяния света

Предыдущие исследователи классифицировали слои с дымкой разной интенсивности на основе значения полного коэффициента рассеяния света на длине волны 0,55 мкм. При этом требовалось, чтобы в воздухе не было ледяных кристаллов. Если $\sigma < 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, то считалось, что дымка отсутствует, при $2 \cdot 10^{-5} < \sigma < 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ – она слабая, а зоны с $\sigma > 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ рассматривались как зоны с сильной дымкой. Для сопоставимости данных мы воспользуемся той же классификацией.

Самолетные измерения, выполненные ранее в Канадском секторе Арктики [2], показали, что слои с сильной дымкой, толщиной несколько десятков и первых сотен метров, чередуются с <чистыми> слоями, где значения σ на 1–2 порядка величины меньше. Наши измерения подтвердили эти представления, причем не только для Канадского, но и для Российского сектора Арктики, а также для района о. Шпицберген. Типичные вертикальные профили σ приведены на рис. 1.

Единственным исключением, как было отмечено, оказался вертикальный профиль σ , полученный вблизи северо-восточной оконечности Гренландии 31 марта 1994 г.

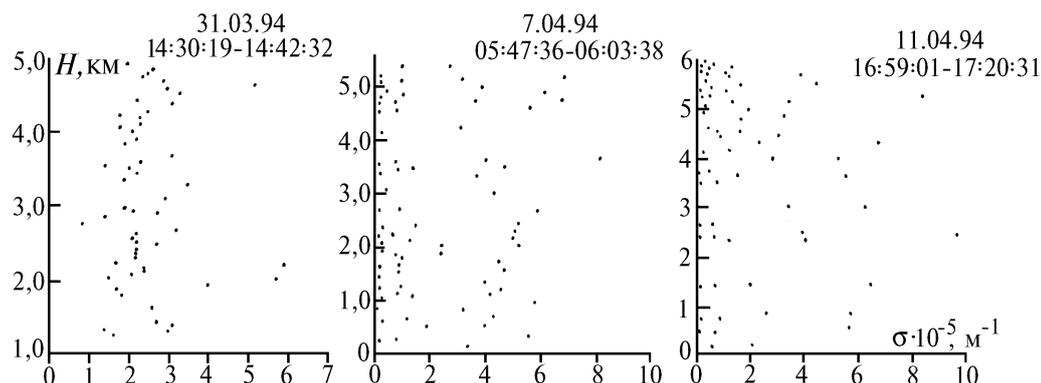


Рис. 1. Типовые вертикальные профили коэффициента рассеяния в Атлантическом (31.03.1994 г.), Российском (7.04.1994 г.) и Канадском (11.04.1994 г.) секторах Арктики

В табл. 1 приведена накопленная повторяемость значений коэффициента рассеяния в слоях 1–2 и 5–6 км в Канадском и Российском секторах Арктики при вертикальном зондировании и на высотах 0,15 и 4 км при горизонтальном зондировании атмосферы. Как видно, повторяемость значений $\sigma > 3 \cdot 10^{-5} / \text{см}^{-1}$, что по классификации [2, 3] соответствует дымке, составляла 15–30%. В то же время 50–70% объема заполнялись оптически <чистыми> слоями с $\sigma < 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$.

Таблица 1

Накопленная повторяемость (%) значений коэффициента рассеяния σ в различных слоях (уровнях) тропосферы в Российском и Канадском секторах Арктики

Сектор Арктики, дата	При вертикальном зондировании. Слой тропосферы, км	При горизонтальном зондировании, высота, км	Количество единичных измерений	Коэффициент рассеяния $\sigma \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$										
				<1	<2	<3	<5	<6	<7	<8	<9	<10	<12	<13
Российский, 6.04.1994	1–2		30	–	57	57	–	90	–	97	–	100	–	–
Российский, 6.04.1994		4,0	72	40	57	68	85	–	93	–	100	–	–	–
Российский, 7.04.1994	5–6		36	–	52	64	–	89	–	100	–	–	–	–
Канадский, 10.04.1994	1–2		74	–	41	61	–	82	–	93	–	97	97	100
Канадский, 11.04.1994		0,15	84	45	74	80	95	–	100	–	–	–	–	–
Канадский	5–6		138	–	64	69	–	89	–	94	–	96	96	100

Отметим, что при визуальных наблюдениях с борта самолета обнаруживались тонкие слои дымки на фоне горизонта, как это описано в [2, 3].

Столь сильно изрезанные вертикальные профили σ (рис. 1) трудно было сравнивать между собой, поэтому они усреднялись по слоям толщиной около 1 км. Количество индивидуальных измерений, подвергшихся усреднению в каждом слое, составляло от 6 до 36. Средние значения $\bar{\sigma}$ в километровых слоях и их 95%-е доверительные интервалы приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что средние значения $\bar{\sigma}$ варьировали от одного километрового слоя к другому не более чем в 1,5–2 раза, что с учетом большой изменчивости σ внутри каждого километрового слоя (чередования тонких слоев с дымкой с оптически <чистыми> слоями) не может считаться значимым различием. Таким образом, в исследованных нами случаях значения σ не убывали с высотой, как это было в случаях, описанных в [2, 3].

Вертикальные профили были получены в 9 районах в Российском, Канадском и Атлантическом секторах Арктики. Сравнение значений, усредненных по километровым слоям, показало незначимость различий при имеющемся объеме данных, полученных для различных секторов.

Самолет выполнял не только вертикальное зондирование атмосферы, но и пролеты вдоль горизонтальных площадок длиной 100–150 км. Измерения значений σ , выполненные с помощью лидара, показали, что коэффициент рассеяния света весьма неоднороден не только по вертикали, но и по горизонтали, изменяясь на расстоянии в несколько километров на 1–2 порядка величин. При этом повторяемость горизонтальных участков с сильной дымкой (т.е. $\sigma > 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$) составила около 30% (табл. 1)

Средние значения коэффициента рассеяния света и их 95%-е доверительные интервалы по Стьюденту (10^{-5} м^{-1}) в различных слоях тропосферы Арктики

Высота, км	Дата								
	31.03.94	4.04.94	6.04.94	7.04.94	10.04.94	11.04.94	11.04.94	12.04.94	12.04.94
	Время, по Гринвичу, ч, мин								
	14.30–14.42	08.05–08.14	05.27–05.48	05.47–06.06	18.29–18.51	16.59–17.20	21.41–21.53	15.44–16.05	21.00–21.21
	Координаты								
	84°с.ш. 28°з.д.	79°с.ш. 92°в.д.	82°с.ш. 116°в.д.	85°с.ш. 85°в.д.	75°с.ш. 135°з.д.	75°с.ш. 95°з.д.	78°с.ш. 121°з.д.	75°с.ш. 73°з.д.	64°с.ш. 68°з.д.
Секторы Арктики									
Атлантический	Российский	Российский	Российский	Канадский	Канадский	Канадский	Канадский	Канадский	Канадский
5–6	–	–	–	2,4±1,1	8,2±2,1	1,8±1,1	–	2,7±1,0	1,9±0,9
4–5	–	–	1,7±0,7	2,1±1,5	3,8±1,0	2,8±2,8	3,2±1,1	2,6±1,0	2,3±0,8
3–4	2,4±0,7	4,9±4,0	3,3±0,6	2,4±1,2	3,0±1,1	2,0±1,2	2,5±0,9	2,6±1,0	2,8±0,8
2–3	2,3±0,5	3,6±3,2	3,5±1,1	2,1±0,7	3,0±1,0	2,7±2,2	2,6±1,1	2,4±1,0	2,5±1,0
1–2	2,8±1,0	3,1±2,6	3,0±1,2	2,5±1,3	5,0±2,7	2,3±3,4	2,9±1,3	2,3±0,8	2,5±0,9
0–1	–	–	3,0±0,5	2,8±2,1	2,4±0,9	2,1±1,4	–	2,3±0,6	2,3±0,8

Одновременное наличие вертикальной и горизонтальной изменчивости значений σ свидетельствует о том, что слои с дымкой сильно флуктуируют.

По существующим представлениям концентрация аэрозоля в тропосфере Канадского и Атлантического секторов Арктики максимальна ранней весной и минимальна летом [3, 5]. На рис. 2 представлены вертикальные профили усредненных по километровым слоям значений σ , полученных при измерениях 15.06.1993 г. и 6.04.1994 г. в Российском секторе, над центральной частью моря Лаптевых (к СЗ от Новосибирских островов). Траектории воздушных масс, проходящих в районы измерений, в эти два дня мало различались: в обоих случаях они носили петлеобразный характер, причем воздух длительное время (свыше 5–7 сут.) находился в пределах Арктического бассейна (севернее полярного круга).

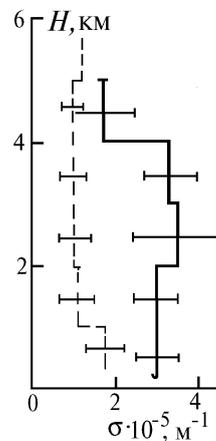


Рис. 2. Вертикальные профили усредненных по километровым слоям значений коэффициента рассеяния σ над морем Лаптевых. Горизонтальные отрезки – 95%-е доверительные интервалы. Сплошные линии – 6.04.94 г., штриховые – 15.06.93 г.

Из рис. 2 следует, что в июне значения $\bar{\sigma}$ были в 2–3 раза меньше, чем в апреле, причем эти различия оказались статистически значимыми.

5. Выводы

Анализ вертикальных профилей коэффициента рассеяния света на длине волны 0,53 мкм, полученных путем самолетных лидарных измерений в Канадском, Российском и Атлантическом секторах Арктики, показал следующее:

1. В зимнее время в Арктике при отсутствии облачности наблюдаются слои со значениями σ , превышающими $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, что классифицируется как слои с арктической дымкой – скопление аэрозоля. Слои с дымкой заполняют тропосферу на 15–30%. Максимальные значения σ достигают $(8-9) \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$.

2. Значимых с учетом объема имевшихся данных различий между аэрозольными по километровым слоям значениями не обнаруживалось ни по высоте, ни от одного сектора Арктики к другому. Это дает основание полагать, что в зимнее время вся тропосфера арктического бассейна заполнена слоями с дымкой.

3. По данным измерений в центральной части моря Лаптевых в июне 1993 г. средние значения $\bar{\sigma}$ были в 2–3 раза меньше, чем в апреле 1994 г.

4. Помимо вертикальной изменчивости в тропосфере Арктики наблюдается и ее горизонтальная изменчивость. При этом повторяемость участков с дымкой составляла около 30%. Одновременное наличие вертикальной и горизонтальной изменчивости σ говорит о том, что слои с дымкой сильно флуктуируют.

5. Во многом полученные нами данные о распределении коэффициента рассеяния света в безоблачной атмосфере Арктики могут быть объяснены гипотезой о выносе промышленных загрязнений из умеренных широт.

Авторы благодарны Институту физики атмосферы Университета г. Майнц и Метеорологической обсерватории г. Линдерберг за финансовый и организационный вклад в проведение самолетной экспедиции.

1. Barrie L.F. // Atmospheric Environment. 1986. V. 20. P. 643–663.
2. Radke L.F., Lyons J.H., Hegg D.A., Hobbs P.V., Bailey I.H. // Geophys. Research Lett. 1984. V. 11. №5. P. 393–396.
3. Brock C.A., Radke L.F., Hobbs P.V. // J. of Atmosph. Chem. 1989. V. 9. P. 129–148.
4. Brock C.A., Radke L.F., Lyons J.H., Hobbs P.V. // J. of Geophys. Research. 1990. V. 95. №13. P. 22369–22387.
5. Ottar B., Pacyna J.M., Berg T.C. // Atmosph. Environm. 1986. V. 20. P. 87–100.
6. Kahn K.A. // Atmosph. Environm. 1981. V. 15. P. 1447–1455.
7. Leiterer Von U., Stolte R., Graeser J., Skuratov S. // Z. Meteorol. 1991. V. 41. P. 91–97.
8. Герман А.И., Тихонов А. П., Тяботов А. Е. // Труды ЦАО. 1975. Вып. 109. С 51–65.

Центральная аэрологическая абсерватория,
г. Долгопрудный

Поступила в редакцию
15 июля 1994 г.

V.U. Khattatov, A.E. T'abotov, A.P. Alekseev, A.A. Postnov. **Results of Aerosol Lidar Studies in the Free Troposphere of Arctic.**

The paper presents the results of tropospheric aerosol airborne studies in various regions of the Arctic in March–April, 1994 and June, 1993. Given are the data on spatial distribution of the haze in the Arctic sectors of Russia, North Atlantic and Canada. The haze was investigated with a lidar aboard the IL-18 research aircraft. The paper gives the vertical and horizontal distribution of light scattering coefficient σ , which characterizes the optical density of tropospheric aerosol, including the haze. It has been found that in spring values of σ the haze in various regions of Arctic differ insignificantly. However, in summer when haze is absent for the values of σ are 1/2 or 1/3 as large as those during the haze period.