

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛИДАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОЗОЛЯ С БОРТА САМОЛЕТА В ТРОПОСФЕРЕ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

Представлены результаты исследований аэрозоля в свободной тропосфере Северного полушария. Получены данные о пространственном распределении арктической дымки и фонового аэрозоля в северных и средних широтах России, Северной Америки, Канады, Северной Атлантики. Исследование аэрозоля проводилось с помощью лидара с борта самолета-метеолаборатории ИЛ-18 «Циклон». Приведены данные о распределении по высоте коэффициентов рассеяния и деполяризации. Обнаружено, что профили коэффициента рассеяния для арктической дымки в различных регионах Арктики испытывают сильные флуктуации, однако его средние значения слабо отличаются между собой. Результаты летних исследований, а также измерений, выполненных в зимне-весенний период в районах, где арктическая дымка отсутствовала, показали, что тропосферный аэрозоль имеет мелкоячеистую и слоистую структуру. Его коэффициенты объемного рассеяния и деполяризации находятся в пределах $(0,8-8,4) \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ и 0,01–0,15 соответственно. Величина этих характеристик существенно зависит от загрязнения атмосферы, от географического положения района измерений относительно промышленных регионов, а также от метеорологической ситуации. В частности, от направления движения воздушных масс и распределения температуры.

1. Введение

Многолетние исследования тропосферного аэрозоля в Северном полушарии до 80-х гг. имели в географическом плане, в основном, локальный характер и поэтому не давали достаточной информации о пространственном распределении этого компонента атмосферы. Проводимые в последние годы комплексные исследования аэрозоля в северных и средних широтах с привлечением летательных аппаратов существенно расширили спектр данных о природе аэрозоля, его микрофизических и структурных параметрах, о его влиянии на загрязнение атмосферы, а соответственно на радиационный баланс и климат Северного полушария, а также на химию тропосферы. В процессе этих исследований большое внимание уделяется исследованию арктического аэрозоля, в частности арктической дымки, которая представляет собой скопление аэрозоля в пределах всей тропосферы полярного региона.

В данной статье представлены результаты исследований коэффициентов рассеяния σ и деполяризации δ тропосферного аэрозоля, в том числе и арктической дымки, которые были получены с помощью лидара, установленного на борту самолета-метеолаборатории ИЛ-18 в совместном российско-германском эксперименте в летние и зимне-весенние периоды 1993–1995 гг. в северных и средних широтах России, Северной Америки, Канады, Северной Атлантики и т.д. В процессе этих исследований лидарное зондирование атмосферы производилось по вертикальным либо горизонтальным трассам на длине волны 0,53 мкм. Регистрация и обработка информации осуществлялись вдоль трассы зондирования через 10–20 м с помощью автоматизированной системы.

Ошибки измерения коэффициентов рассеяния σ и деполяризации δ составляли соответственно 22 и 9%.

Данная работа является продолжением исследований аэрозоля в Северном полушарии, результаты 1-го этапа которых представлены в [1].

2. Пространственное распределение арктической дымки

Исследование арктической дымки актуально по нескольким причинам, основными из которых являются:

- влияние арктической дымки на радиационный баланс и на климат Северного полушария;
- физика образования дымки, т.е. это явление антропогенного или естественного происхождения;

- влияние дымки на загрязнение тропосферы Арктики в зависимости от метеорологического состояния атмосферы этого региона;
- распределение дымки в пространстве в зависимости от географического положения исследуемого региона Арктики и т.д.

Выполненные исследования арктической дымки с борта самолета [1–9] показали, что это метеорологическое явление имеет антропогенное происхождение. Оно наблюдается как при быстром выносе воздушных масс из какого-либо индустриального района умеренных широт [2, 7], так и в воздушных массах, которые длительное время не имели контакта с источниками аэрозолей промышленного происхождения.

В ходе российско-германских исследований в отличие от предыдущих самолетных измерений [3, 6, 8, 9], носящих региональный характер, удалось собрать данные об оптических и метеорологических характеристиках тропосферы в 17 районах различных секторов Арктики.

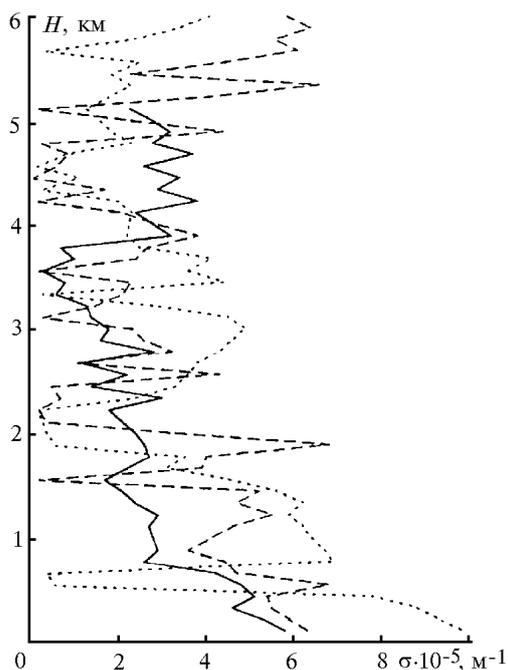


Рис. 1. Вертикальные профили коэффициентов рассеяния для арктической дымки: сплошная линия – для Атлантического сектора, 30.03.94 г., 79°с.ш., 04°в.д.; штриховая – для Российского сектора, 7.04.94 г., 85°с.ш., 85°в.д.; точки – для Канадского сектора, 11.04.94 г., 75°с.ш., 95°з.д.

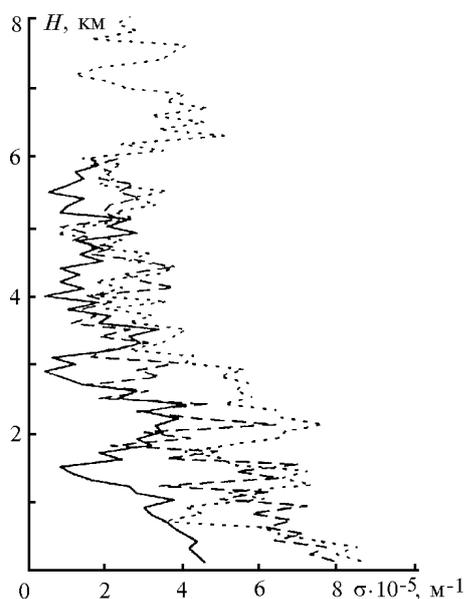


Рис. 2. Вертикальные профили коэффициентов рассеяния для арктической дымки: сплошная линия – Гренландское море, 7.04.95 г., 84.5°с.ш., 05°з.д.; штриховая – Северная земля, 24.03.95 г., 78°с.ш., 98°в.д.; точки – море Бофорта, 31.03.95 г., 75°с.ш., 155°з.д.

На рис. 1 и 2 представлены вертикальные профили коэффициента рассеяния, полученные соответственно в 1994 и 1995 гг. для Атлантического, Российского и Канадского секторов. Эти профили получены с усреднением по высоте через 100 м.

Из анализа представленных данных видно, что арктическая дымка имеет слоистую структуру, так как коэффициент рассеяния испытывает большие флуктуации в зависимости от высоты. Наиболее плотной она является в приземном слое до высоты 1,5–2 км. На больших высотах наблюдаются отдельные слои толщиной от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Оценка оптической плотности слоев дымки здесь производилась в соответствии с ранее принятой классификацией [1, 3, 4], согласно которой при $\sigma < 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ дымка отсутствует, при $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1} < \sigma < 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ она слабая, а зоны с $\sigma > 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ рассматривались как с плотной дымкой.

Оптическая плотность дымки и интенсивность ее слоев существенно зависят от метеорологических условий и типа подстилающей поверхности. Обнаружено, что при переносе воздушных масс над ледовой или заснеженной поверхностями в Канадском, Российском и Американском секторах, когда происходят сильное выхолаживание и формирование глубоких инверсий, препятствующих турбулентному перемешиванию загрязнений, поступающих в атмосферу, слоистость дымки является наиболее выраженной. Над открытой водной поверх-

ностью, где турбулентное перемешивание было сравнительно сильным, что наблюдалось в районе Гренландского моря 30.03.94 г. и 7.04.95 г., вертикальные профили коэффициента рассеяния были более однородными.

Для более наглядного сравнения вертикальных профилей коэффициентов рассеяния σ для различных районов производилось их усреднение по слоям толщиной около 1 км. При этом количество отдельных измерений, подвергшихся усреднению в каждом слое, составляло от 16 до 48. Средние значения $\bar{\sigma}$ в километровых слоях и их 95%-е доверительные интервалы представлены в таблице, из которой видно, что значения $\bar{\sigma}$ варьировали от одного слоя к другому не более чем в 2 раза для высот свыше 2 км и лишь для приземного слоя они были несколько больше.

В результате лидарного зондирования тропосферы по горизонтальным трассам установлено, что профили коэффициента рассеяния весьма неоднородны не только по вертикале, но и по горизонтали. При полетах самолета вдоль горизонтальных площадок длиной 150–200 км значения σ изменялись на 1–2 порядка. Наличие большой изменчивости вертикальных и горизонтальных профилей σ свидетельствует о том, что арктическая дымка является весьма неоднородной средой, которая заполняет всю тропосферу арктического региона.

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

H, км	Дата								
	24.03.95	26.03.95	31.03.95	01.04.95	02.04.95	03.04.95	04.04.95	06.04.95	07.04.95
	Время по Гринвичу, ч, мин								
	06.32–06.56	23.48–00.09	23.48–00.19	20.50–21.07	19.49–20.13	21.29–21.50	18.20–18.37	16.45–17.32	14.59–15.30
	Координаты								
78°с.ш. 98°в.д.	75°с.ш. 168°з.д.	75°с.ш. 155°з.д.	72°с.ш. 155°з.д.	75°с.ш. 145°з.д.	74°с.ш. 105°з.д.	78°с.ш. 125°з.д.	78°с.ш. 15°в.д.	84,5°с.ш. 5°з.д.	
Секторы Арктики									
	Российский	Российский	Канадский	Канадский	Канадский	Канадский	Канадский	Атлантический	Атлантический
6–7	–	–	3,8±1,1	–	–	2,4±1,2	–	2,7±0,9	–
5–6	2,3±0,6	3,6±1,2	2,9±0,8	2,1±1,1	4,3±2,2	3,5±1,9	–	1,9±0,4	1,2±0,6
4–5	3,1±0,7	2,1±0,9	2,2±1,2	1,9±1,2	2,8±1,3	2,1±0,8	3,5±1,2	2,1±0,7	1,4±0,9
3–4	1,9±0,5	2,8±1,6	3,1±0,9	2,7±0,8	2,1±1,0	2,6±1,3	1,7±0,8	1,8±0,8	1,9±1,1
2–3	3,2±1,1	2,1±0,7	5,4±2,2	3,1±1,6	2,6±1,4	3,8±2,2	4,6±2,3	2,7±1,1	2,5±1,6
1–2	4,3±1,3	3,5±2,1	5,8±1,6	4,9±2,1	3,7±2,4	4,6±2,0	2,8±1,6	3,1±1,6	2,3±1,4
0–1	6,4±1,7	5,1±1,7	6,1±2,1	5,4±1,7	5,3±2,1	5,1±1,6	6,1±2,4	3,4±1,2	3,8±1,7

3. Результаты исследований фонового аэрозоля

Многолетние исследования атмосферного аэрозоля в Северном полушарии и, в частности в Арктике, показали, что значительное влияние на загрязнение этих регионов оказывает дальний перенос примесей из промышленных континентальных регионов. Для оценки этих загрязнений, а также для сопоставления зимне-весенних результатов, когда арктическая дымка существует, и летних данных, когда это явление отсутствует, были проведены исследования оптических характеристик аэрозоля в свободной тропосфере высоких и средних широт. Эти исследования выполнялись в летнее время во всех вышеуказанных регионах, а также в зимне-весенние периоды в тех регионах, где арктическая дымка отсутствует.

Выполненные измерения коэффициентов рассеяния и деполяризации показали, что тропосферный аэрозоль, как и дымка, имеет слоистую структуру. При этом слое являются не сплошными, а состоят из отдельных ячеек, размеры которых на высотах более 3 км составляют несколько десятков метров. На меньших высотах их размеры находятся в пределах нескольких сотен метров. Коэффициенты объемного рассеяния и деполяризации имеют в основном значения $\sigma = (0,8–8,4) \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, $\delta = 0,01–0,15$.

Оптические и структурные параметры аэрозольных образований существенно зависят от метеорологических условий и места проведения измерений. Особенно это контрастно проявляется, когда исследования проводятся в регионах, удаленных от промышленных районов и вблизи их, либо в зоне интенсивного переноса загрязнений.

На рис. 3 и 4 приведены результаты исследований вертикального распределения коэффициентов рассеяния и деполяризации для тропосферы Арктики и средних широт Сибири. На

этих рисунках представлены профили средних значений $\bar{\sigma}$ и $\bar{\delta}$. Здесь усреднение производилось по высоте через 0,5 км. При таком усреднении распределение $\bar{\sigma}$ и $\bar{\delta}$ по высоте не имеет больших флуктуаций, однако одиночные профили σ могут изменяться в пределах одного порядка и более, а значения δ иногда достигают 0,3. До высоты 4 км существенно выделяется профиль σ , полученный 16.06.93 г. Здесь большие значения коэффициентов σ и δ получаются, очевидно, из-за загрязнений атмосферы, переносимых из промышленных южных регионов Сибири, а также от лесных пожаров, которые часто бывают в этих районах.

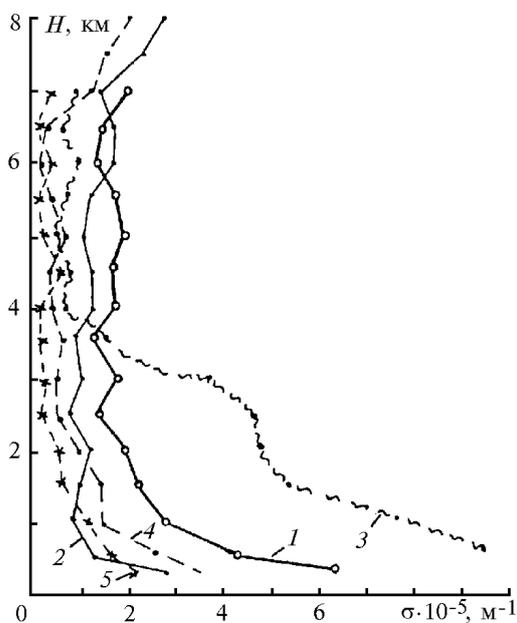


Рис. 3. Вертикальные профили коэффициентов рассеяния для фоновго аэрозоля: кривая 1 – 14.06.93 г., 78°с.ш., 85°в.д.; 2 – 15.06.93 г., 81°с.ш., 124°в.д.; 3 – 16.06.93 г., 60°с.ш., 88°в.д.; 4 – 17.06.93 г., 69°с.ш., 87°в.д.; 5 – 18.06.93 г., 74°с.ш., 65°в.д.

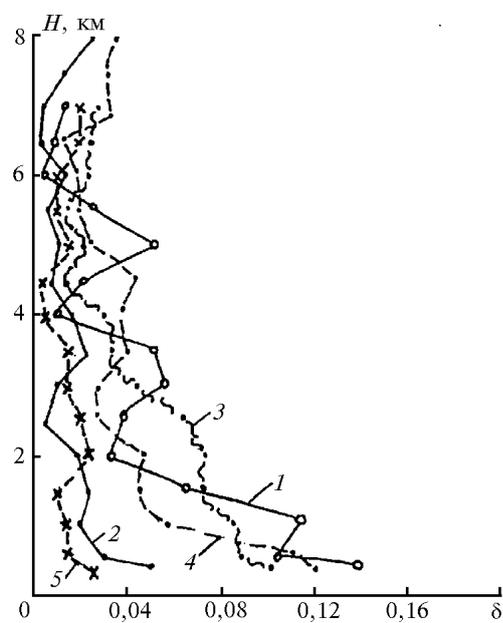


Рис. 4. Вертикальные профили коэффициентов деполаризации для фоновго аэрозоля: кривая 1 – 14.06.93 г., 78°с.ш., 85°в.д.; 2 – 15.06.93 г., 81°с.ш., 124°в.д.; 3 – 16.06.93 г., 60°с.ш., 88°в.д.; 4 – 17.06.93 г., 69°с.ш., 87°в.д.; 5 – 18.06.93 г., 74°с.ш., 65°в.д.

При сопоставлении результатов лидарных измерений σ и δ с метеорологической ситуацией, в частности с профилями температуры и влажности, обнаружена высокая корреляция между этими параметрами. Во всех случаях наших исследований под инверсионными слоями значения коэффициентов рассеяния и деполаризации были больше, чем в прилегающих областях. Это говорит о том, что инверсионные слои являются задерживающим фактором при распространении загрязнений вверх.

Выводы

В результате выполненных исследований оптических характеристик аэрозоля в тропосфере Северного полушария установлено следующее:

1. В зимне-весенний период в тропосфере Арктики наблюдается большое скопление аэрозоля, получившего название «арктическая дымка», для которой максимальные значения σ достигают $(8-9) \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$,
2. Арктическая дымка представляет собой метеорологическое явление большого регионального масштаба.
3. Дымка находится во всей тропосфере Арктики, а не только в пределах пограничного слоя, как считалось раньше.
4. Арктическая дымка распределена в тропосфере в виде слоев, при этом над ледовой и заснеженной поверхностями слои сформированы более контрастно; над открытой водной по-

верхностью, где восходящее движение воздушных масс более интенсивное, дымка распределена более равномерно.

5. Помимо вертикальной изменчивости σ в тропосфере Арктики наблюдается и его горизонтальная изменчивость. Одновременное наличие вертикальной и горизонтальной изменчивости σ говорит о том, что слои с дымкой сильно флуктуируют.

6. В летнее время аэрозоль имеет слоисто-ячеистую структуру, ячейки и толщина слоев имеют размеры от нескольких десятков до нескольких сотен метров.

7. Неоднородная структура аэрозоля вызывает большие флуктуации коэффициентов рассеяния и деполяризации, которые имеют значения $\sigma = (0,8-8,4) \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, $\delta = 0,01-0,15$; одиночные профили σ могут изменяться по высоте в пределах одного порядка и более, а δ иногда достигает 0,3.

8. Значения вышеуказанных коэффициентов существенно зависят от места проведения измерений, особенно это проявляется, когда исследования проводятся в регионах, удаленных от промышленных районов и вблизи их, либо в зонах интенсивного переноса загрязнений.

9. Полученные нами данные о распределении коэффициента рассеяния лазерного излучения в безоблачной атмосфере Арктики могут быть объяснены гипотезой о выносе загрязнений из континентальных загрязненных районов.

1. Хаттатов В.У., Тяботов А.Е., Алексеев А.П., Постнов А.А. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 11. С. 1489–1495.
2. Barrie L.A. // Atmosph. Environ. 1986. V. 20. P. 643–663.
3. Radke L.F., Lyons J.H., Hegg D.A., Hobbs P.V., Bailey I.H. // Geophys. Research Letters. 1984. V. 11. N 5. P. 393–396.
4. Brock C.A., Radke L.F., Lyons J.H., Hobbs P.V. // J. of Atmosph. Chem. 1989. V. 9. P. 129–148.
5. Brock C.A., Radke L.F. and Hobbs P.V. // J. of Geophysical Research. 1990. V. 95. N 13. P. 22369–22387.
6. Ottar B., Расуна J.M., Berg T.C. // Atmosph. Environ. 1986. V. 20. P. 87–100.
7. Kahn K.A. // Atmosph. Environ. 1981. V. 15. P. 1447–1455.
8. Алексеев А.П., Досов В.Н., Скуратов С.Н., Тяботов А.Е., Хаттатов В.У. // XI симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Тезисы докл. Томск, 1993. С. 23–26.
9. Leitterer Von.U., Stolte R., Graeser J., Skuratov S.Z. // Meteorol. 1991. N 41. P. 91–97.

Центральная аэрологическая обсерватория
г. Долгопрудный, Московская обл.

Поступила в редакцию
29 июля 1997 г.

V. U. Khattatov, A. E. Tyabotov, A. A. Postnov. **Results of Aircraft Lidar Studies of the Aerosol in the Troposphere of the North Hemisphere.**

The results of studying aerosols in the free troposphere of the Northern Hemisphere are presented. Data have been obtained on the space distribution of Arctic haze and background aerosol in the northern and middle latitudes of Russia, North America, Canada and North Atlantic. Aerosol was studied using lidar on board the aircraft research lab IL-18 «Cyclone». Data are presented on the height distribution of scattering and depolarization coefficients. It has been found that the profiles of the scattering coefficient for arctic haze in various regions of the Arctic experience strong fluctuations; its mean values, however, differing insignificantly. The results of summer-time studies as well as the measurements made in winter and spring in regions with no haze have shown that tropospheric aerosol has a fine-cell and stratified structure. Its volume scattering and depolarization coefficients are within $(0,8-8,4) \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ and 0.01–0.15 ranges, respectively. The values of these characteristics depend considerably on atmospheric pollution, geographical position of the measurement region relative to industrial regions as well as on meteorological situation. In particular, it depends on the direction of air parcels motion and temperature distribution.