

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ И САЖИ
ПО ДАННЫМ САМОЛЕТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И СОЛНЕЧНОЙ ФОТОМЕТРИИ**

Д.Г. Чернов, Т.В. Бедарева

**DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF ATMOSPHERIC AEROSOL
AND BLACK CARBON FROM AIRBORN SENSING AND SOLAR PHOTOMETRY DATA**

D.G. Chernov, T.V. Bedareva

Важную роль при исследовании высотных профилей массовой концентрации сажи и субмикронного аэрозоля в тропосфере играет самолетное зондирование. С помощью самолетов-лабораторий АН-30 «Оптик-Э» (1999–2011 гг.) и ТУ-134 «Оптик» (с 2011 г.) над южным районом Сибири (Новосибирская обл.) проводятся регулярные, а над ее северо-восточными районами (55–62° N, 83–130° E) – эпизодические (2008, 2010 и 2012 гг.) измерения этих характеристик. В данной работе представлены интегральные (по толще атмосферы до 7 км) значения массовой концентрации сажи M_{BC}^{col} и оптической толщи аэрозоля на длине волны 0.53 мкм, рассчитанные по измеренным высотным профилям; анализируется их временная изменчивость. Проведено сопоставление M_{BC}^{col} с результатами восстановления массовой концентрации сажи в столбе атмосферы по данным фотометрических измерений.

Airborn sensing plays important role in the studying vertical profiles of mass concentration of black carbon and submicron aerosol in the troposphere. With the use of measurement instrumentations aboard an AN-30 Optic-E (1999–2011) and a TU-134 Optic (from 2011) aircrafts the regular (over the south of Novosibirsk region, Siberia) and episodic (over the north-eastern territory of Siberia (55–62° N, 83–130° E); 2008, 2010 and 2012) measurements of these characteristics are carried out. In the present work the integrated (over the thickness of the atmosphere up to 7 km) mass concentration of black carbon M_{BC}^{col} and the aerosol optical depth at a wavelength of 0.53 μm, calculated from the measured vertical profiles, are presented; their temporal variability is analyzed. A comparison between the M_{BC}^{col} values and the columnar black carbon mass concentration retrieved from the photometric measurements was performed.

Самолетные исследования вертикальных профилей концентраций субмикронного аэрозоля и сажи (неорганического углерода, black carbon) в тропосфере до высоты 7 км в районе Завьялово (юг Новосибирской области) выполняются один раз в месяц с 1999 г. До 2011 г. аэрозольные измерения производились на борту самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» [Аршинов, 2009], а с марта 2011 г. на самолете-лаборатории ТУ-134 «Оптик» [Антохин и др., 2011]. Состав аппаратуры и методика аэрозольных измерений детально апробированы в период многолетнего самолетного зондирования тропосферы с 1999 г. в указанном базовом районе исследований и подробно описаны в [Аршинов и др., 2009]. Полеты выполнялись в дневное время в основном в условиях безоблачной атмосферы со средней продолжительностью около 2 ч. При анализе результатов основное внимание уделялось данным измерений в горизонтальном полете на высотах 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.5 и 7.0 км. Полет на каждой из высот продолжался 8–10 мин.

Анализ высотных профилей концентраций аэрозоля и сажи позволил установить ряд устойчивых общих особенностей изменчивости их формы [Козлов и др., 2009]. Как правило, высотные профили аэрозоля и сажи близки по форме и могут обнаруживать локальные максимумы значений на определенных высотах. В среднем проявляется тенденция убывания концентраций с ростом высоты. Особенности сезонной изменчивости профилей характеризуются определенной межгодовой устойчивостью. Так, в холодный период наблюдаются более широкие пределы изменчивости профилей, в основном за счет достижения высоких уровней концентрации в нижнем (1.5 км) слое воздуха. В значительной сте-

пени это обусловлено частыми приземными температурными инверсиями в холодный период года, характерными для Сибири. В теплый период динамика профилей по высоте менее выражена.

На рис. 1 представлены среднесезонные вертикальные профили для 1999–2008 и 1999–2011 гг. Видно небольшое отличие сезонных профилей для данных временных периодов, что свидетельствует о межгодовой устойчивости сезонных профилей концентраций аэрозоля и сажи.

В табл. 1 для периода с 1999 по 2011 г. приведены оценки интегральных по толще атмосферы среднесезонных значений массовой концентрации сажи M_{BC}^{col} , аэрозольной оптической толщи (АОТ) τ и относительного содержания сажи P_{col} , полученные интегрированием по высоте соответствующих вертикальных профилей концентраций сажи и аэрозоля. Величина относительного содержания сажи определяется как отношение интегральных по толще концентраций сажи и аэрозоля. Из таблицы видно, что для исследуемого региона в условиях незадымленной

Таблица 1

Среднесезонные интегральные значения массовой концентрации сажи M_{BC}^{col} , мг/м², аэрозольной оптической толщи τ на длине волны 530 нм и относительного содержания сажи P_{col} по столбу атмосферы до высоты 7 км, рассчитанные по результатам самолетных измерений с 1999 по 2011 г. в южном районе Западной Сибири (Завьялово).

Сезон	M_{BC}^{col} , мг/м ²	τ	P_{col}
Зима	1.970	0.113	0.065
Весна	1.640	0.180	0.034
Лето	0.781	0.101	0.029
Осень	1.260	0.094	0.050

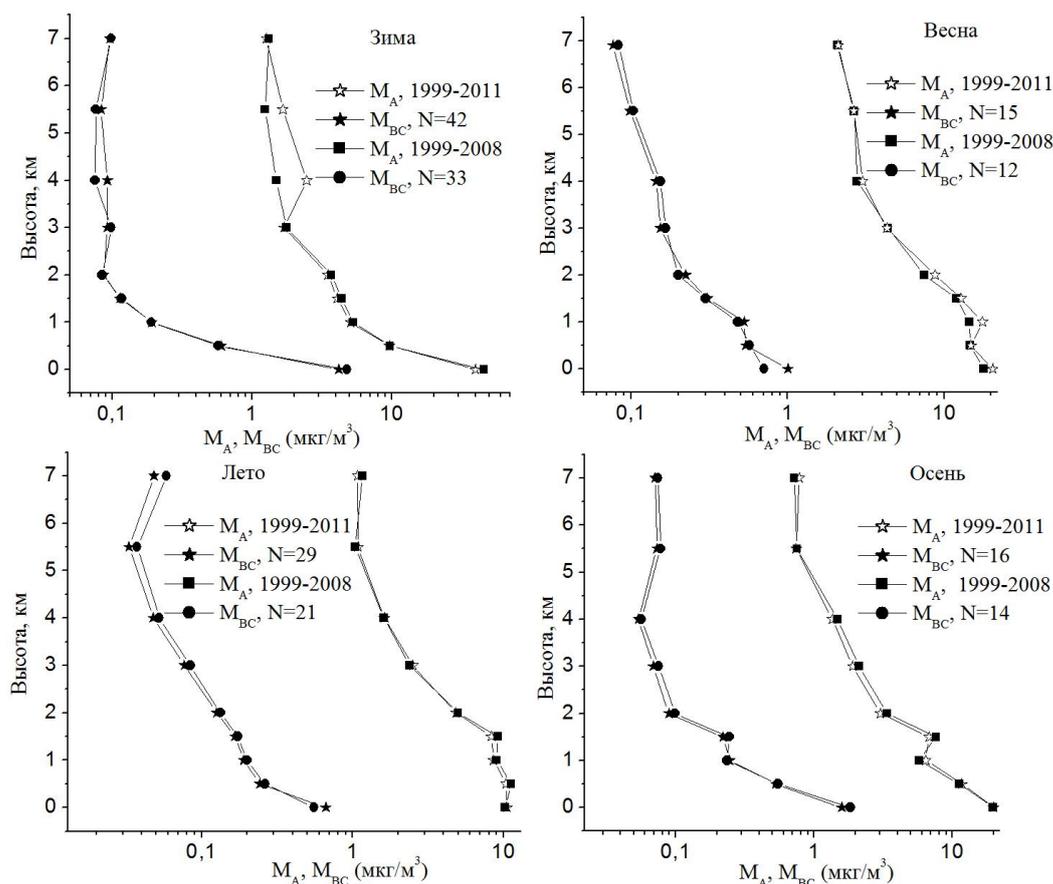


Рис. 1. Средние вертикальные профили массовой концентрации сажи и аэрозоля в зимний (ноябрь–март), весенний (апрель–май), летний (июнь–август) и осенний (сентябрь–октябрь) периоды года.

Таблица 2

Интегральные значения АОТ, массовой концентрации сажи и относительного содержания сажи по столбу атмосферы до высоты 8.5 км по результатам самолетного зондирования тропосферы в северо-восточных районах Сибири.

Маршрут	M_{BC}^{col} , ($\text{мг}/\text{м}^2$)	τ	P_{col}
Новосибирск–Томск (31 июля 2012 г.)	4.250	0.511	0.031
Томск–Мирный (31 июля 2012 г.)	6.190	1.323	0.017
Мирный–Якутск (31 июля 2012 г.)	9.964	2.768	0.014
Якутск–Братск (1 августа 2012 г.)	4.230	0.461	0.034
Братск–Новосибирск (1 августа 2012 г.)	5.360	1.414	0.014
Мирный–Якутск–Ленск (апрель 2010 г.)	0.350	0.086	–
Якутск–Мирный (июль 2008 г.)	1.314	0.639	0.008

безоблачной атмосферы прослеживаются характерные сезонные зависимости изменчивости рассмотренных параметров. Так, значения M_{BC}^{col} , $\text{мг}/\text{м}^2$, и P_{col} характеризуются максимумом в зимний и минимумом в летний периоды года, однако максимум τ наблюдается в весенний период.

Самолетные измерения вертикальных профилей концентраций субмикронного аэрозоля и сажи в северо-восточных районах Сибири выполняются в рамках Российско-Французского проекта YAK-AEROSIB по маршруту Новосибирск–Томск–Мирный–Якутск–Братск–Новосибирск, состоящему из пяти участков, связанных с посадками и дозаправкой самолета в промежуточных аэропортах. Для получения вертикальных и горизонтальных разрезов атмосферы зондирование проводится с изменением высоты полета от 500 м над рельефом поверхности и 100 м в зоне

аэропортов до 8500 м на трассе. На каждом маршрутном участке самолет выполняет несколько подъемов и снижений, в ходе которых измеряются вертикальные профили, разнесенные по горизонтали, что позволяет оценивать горизонтальные и вертикальные градиенты аэрозольных характеристик.

Для каждого цикла полетов на всех маршрутных участках по вертикальным профилям рассчитывались интегральная по толще атмосферы до 8.5 км массовая концентрация сажи, аэрозольная оптическая толщина на длине волны 0.53 мкм и относительное содержание сажи в столбе атмосферы. В табл. 2 приведены значения указанных параметров, рассчитанные по данным самолетного зондирования тропосферы в июле и августе 2012 г. в условиях обширных лесных пожаров на территории Сибири. Для сравнения также приведены оценки, получен-

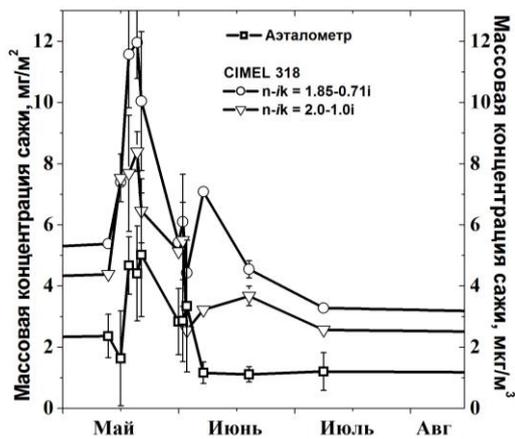


Рис. 2. Сопоставление данных измерений M_{BC} в приземном слое атмосферы (аэталометр) и восстановленных значений M_{BC}^{col} для двух заданных комплексных показателей преломления сажи 1.85–0.71*i* и 2–1*i*.

ные в апреле 2010 г. (в условиях незадымленной атмосферы) и в июле 2008 г. Сопоставление убедительно показывает, что 2012 г. на всех маршрутных участках полетов в Сибири наблюдался сильный рост концентраций аэрозоля и сажи по толще атмосферы, обусловленный воздействием дымов лесных пожаров. Этот вывод подтверждается дополнительно сравнением интегральных концентраций в 2012 г. со средними фоновыми летними значениями на юге Западной Сибири (см. табл. 1).

Для оценки массовой концентрации сажи в столбе атмосферы M_{BC}^{col} по данным пассивного дистанционного зондирования с поверхности Земли (фотометрические измерения сети AERONET; фотометр CIMEL-318) в настоящей работе использовался модифицированный подход Шустера [Schuster et al., 2005]. Входными параметрами для оценки искомой характеристики в видимой и ближней ИК-областях спектра являются аэрозольная оптическая толщина, объемная концентрация аэрозольных частиц, альбедо однократного рассеяния и комплексный показатель преломления, отнесенные ко всему столбу атмосферы. Метод заключается в поиске оптимального соотношения объемных фракций аэрозольных компонент (неорганический углерод, сульфат аммония и вода), обеспечивающего минимум невязки между рассчитанным и «измеренным» комплексным показателем преломления аэрозольного вещества. M_{BC}^{col} оценивается как произведение восстановленной объемной фракции сажи на плотность сажи и объемную концентрацию аэрозоля.

Подход реализован и апробирован на данных натуральных измерений Томской станции AERONET с использованием оптико-микрофизических характеристик аэрозоля, восстановленных методом Дубовика и Кинга [Dubovik, King, 2000]. Валидация полученных результатов проведена с использованием описанных выше данных самолетного зондирования тропосферы. Сложность сопоставления результатов

восстановления M_{BC}^{col} и результатов ее оценок по данным самолетного зондирования состоит в удаленности районов наблюдения, сравнительно низкой частоте полетов (один раз в месяц) и малом числе безоблачных дней. Результаты оценок M_{BC}^{col} были сопоставлены с интегральными значениями, рассчитанными по вертикальным профилям концентрации сажи, полученными в нескольких полетах AN-30 «Оптик-Э» и TU-134 «Оптик». Так, например, 26 мая 2004 г. интегральное значение M_{BC}^{col} , рассчитанное по данным самолетного зондирования, составило 4.9 мг/м², а оцениваемое значение в столбе атмосферы – 5.4 мг/м². При этом величина M_{BC} в приземном слое атмосферы была равна 2.8 мкг/м³.

Важным источником информации о M_{BC} в приземном слое атмосферы является аэталометр. В частности, с 1997 г. такие измерения проводятся на Аэрозольной станции ИОА СО РАН (Томск) в режиме непрерывного мониторинга. Сравнение восстановленных значений массовой концентрации сажи в столбе атмосферы с данными ее измерений в приземном слое показало их качественное согласие и наличие в динамике этих характеристик определенной корреляционной связи. На рис. 2 представлен пример такого сопоставления в весенне-летний период 2004 г.

Получаемые оценки массовой концентрации сажи в столбе атмосферы могут быть использованы для оценки ее воздействия на климатические характеристики.

Авторы выражают благодарность д.ф.м.н М.В. Панченко и д.ф.м.н С.М. Сакерину за возможность использования данных Томской станции AERONET.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-05-93119-НЦНИЛ_а, 12-05-31007 мол_а) и программы ОНЗ РАН № 12.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. и др. Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
- Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К. и др. Самолет-лаборатория AN-30 «Оптик-Э»: 20 лет исследования окружающей среды // Там же. 2009. Т. 22, № 10. С. 950–957.
- Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Панченко М.В. Сезонная изменчивость вертикальных профилей поглощающих характеристик субмикронного аэрозоля в тропосфере // Там же. 2009. Т. 22, № 07. С. 635–642.
- Dubovik O., King M. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N D16. P. 20673–20696.
- Schuster G.L., Dubovik O., Holben B.N., Clothiaux E.E. Inferring black carbon content and specific absorption from Aerosol Robotic Network (AERONET) aerosol retrievals // J. Geophys. Res. Atmos. 2005. V. 110, D10S17. doi:10.1029/2004jd004548.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

