

Г.П. Коханенко, И.Э. Пеннер, В.С. Шаманаев

АВИАЛИДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОЗОЛЯ НАД БАЙКАЛЬСКИМ ЦБК

Проведено самолетное лазерное зондирование аэрозольных загрязнений над целлюлозно-бумажным комбинатом в котловине озера Байкал. Построены горизонтальные и вертикальные разрезы коэффициента ослабления излучения для длины волны 532 нм. Получено, что в столбе атмосферы в районе ЦБК на высотах до 1,5 км содержится 60–100 мг пыли на 1 м² поверхности. Над акваторией озера с наветренной стороны от ЦБК содержание загрязнителей на порядок величины меньше.

Самолетный лидарный контроль антропогенного аэрозоля в промышленных районах уже имеет свою историю [1, 2] и зарекомендовал себя как достаточно эффективный метод. Высокая стоимость использования самолета как платформы окупается тем, что удается за короткий срок обследовать большой объем атмосферы над обширной территорией, в том числе по вертикали от лидара до подстилающей поверхности. Кроме того, использование комплекса аппаратуры расширяет возможности интерпретации данных. Это особенно важно для анализа сложных по составу промышленных выбросов.

Ранее при самолетных экспериментах было установлено, что атмосфера дает неожиданно большой вклад в загрязнение вод озера Байкал [3]. Это предопределило наш повышенный интерес к такому загрязнителю атмосферы в котловине озера, как Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат.

В описываемом эксперименте конфигурация лидара [1] была изменена, и в нем использовались два приемных телескопа с одним лазером. Приемник «Макрель-2М» диаметром 0,2 м использовался в атмосферном канале без анализа поляризации. Сигнал с фотоумножителя ФЭУ-84-3 снимался не только с анода, но и с двух промежуточных диодов (8-го и 10-го). Все эти сигналы одновременно регистрировались многоканальным аналого-цифровым преобразователем. В метрологическом плане была разработана специальная методика калибровки лидара в этом режиме, сшивающая в едином амплитудном масштабе сигналы из различных каналов АЦП. Это позволило регистрировать сигнал в большем динамическом диапазоне и повысить реальный диапазон действия лидара в линейном режиме без ступенчатого изменения чувствительности приемного тракта. Частота посылки импульсов составляла 5 Гц.

В канале зондирования байкальской воды использовался один из приемных телескопов лидара «Светозар-3» [4] диаметром 0,1 м с быстродействующими ФЭУ-144 для поляризационного детектирования. Однако вопросы гидрооптического зондирования в данной статье не рассматриваются.

Обращение лидарных сигналов в профиль коэффициента рассеяния аэрозолей производилось по широко распространенному алгоритму квадратурного накопления [5] с опорной точкой вблизи лидара. Известно, что измерение граничных условий в начале трассы зондирования существенно снижает погрешность решения уравнения лазерного зондирования. В качестве такого датчика начального значения коэффициента рассеяния использовался нефелометр, имеющийся в составе самолета-лаборатории [6].

Зондирование атмосферы над ЦБК производилось 15 июня 1995 г. во время пролетов самолета по кольцевому маршруту над берегом и акваторией оз. Байкал. Пролеты выполнялись на высотах 1600, 1000 и 400 м над уровнем воды в течение 1,5 ч.

Схема залетов по зондированию приведена на рис. 1, где ориентировочно обозначены контур береговой линии (пунктир) и расположение основных дымовых труб (черные столбики). Для наиболее мощных источников загрязнений указано направление распространения дымового шлейфа в период измерений. Самолет заходил со стороны моря (водного зеркала

оз. Байкал), пересекал мыс с ЦБК и снова уходил по замкнутой кривой в море. Стрелками с цифрами указаны точки, для которых дальше (рис. 4, а, б) будут приведены вертикальные профили коэффициента ослабления аэрозоля.

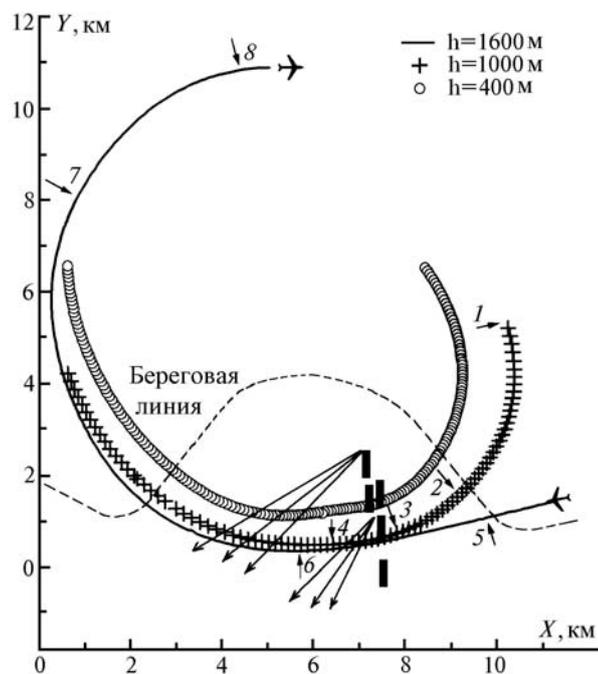


Рис. 1. Схема залетов по зондированию загрязнений. Водное зеркало сверху, суша внизу, береговая линия обозначена пунктиром. Обозначены траектории полета на высотах 1600, 1000 и 400 м. Столбики – основные дымовые трубы ЦБК; стрелки с цифрами – точки контрольного зондирования; длинными стрелками указано преобладающее направление ветра

Пример панорамного профиля коэффициента ослабления $\epsilon(h)$, измеренного при пролете на высоте 1000 м, приведен на рис. 2 в градациях серого цвета. По оси абсцисс указано время полета, 1 мин соответствует примерно 5 км полетной линии. Самолет удерживался на постоянной барометрической высоте, поэтому на рисунке хорошо виден переход от поверхности воды к суше, заметно возвышающейся над уровнем озера.

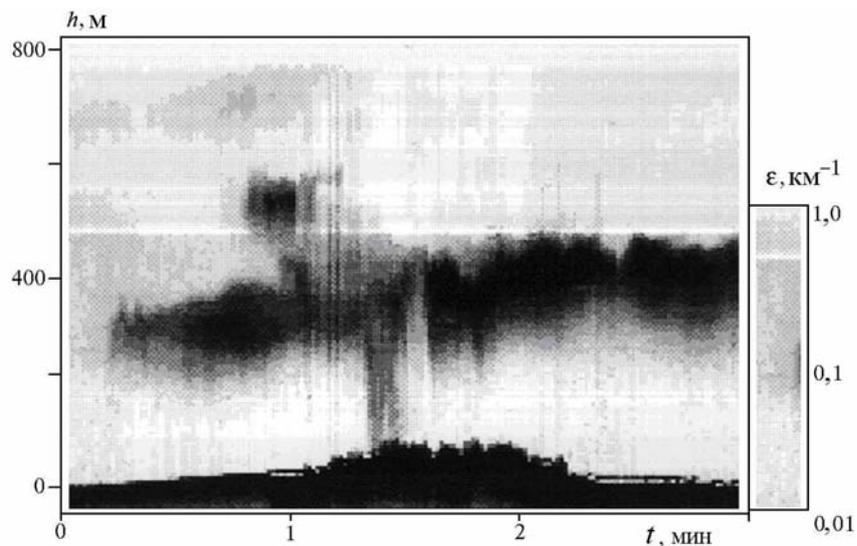


Рис. 2. Панорамный профиль коэффициента ослабления $\epsilon(h)$, полученный при полете на высоте 1000 м

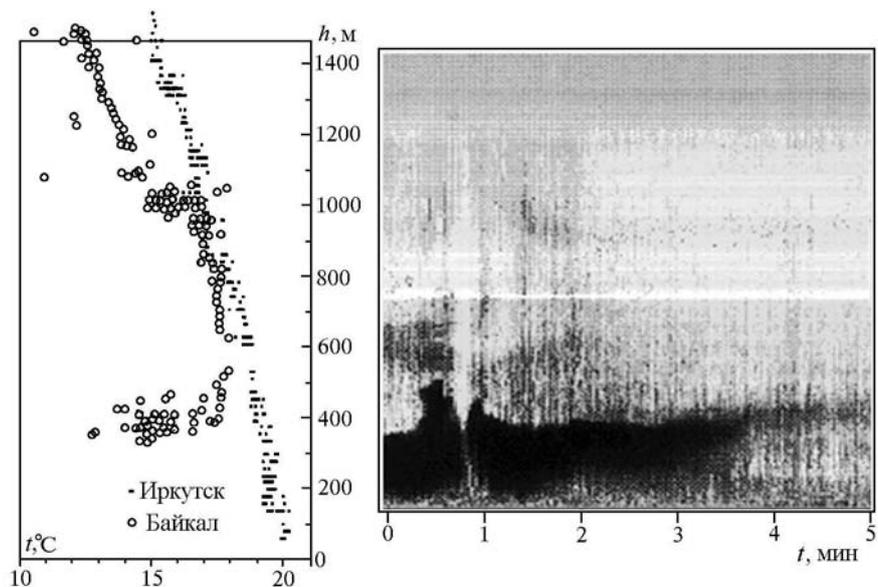


Рис. 3. Панорамный профиль $\epsilon(h)$, полученный при полете на высоте 1600 м. В рамке слева – профили температуры, измеренные при взлете в Иркутске и над ЦБК

На рис. 3 приведена подобная же картина, полученная при зондировании с высоты 1600 м. В левой части рис. 3 приведены измеренные вертикальные профили температуры, полученные на взлете в Иркутске (11¹⁰ местного времени) и в районе измерений (12³⁰). По условиям полета измерить температуру воздуха ниже 400 м над уровнем озера было невозможно. Мгновенные профили коэффициента ослабления для этих панорам (в точках 1–8 по схеме полета, см. рис. 1) приведены на рис. 4, а и б под такими же номерами кривых.

Аэрозольное образование не являлось узким вытянутым шлейфом. Совокупность труб представляла собой генератор аэрозолей, который формировал асимметричное блиноподобное образование. Его верхняя граница задана температурной инверсией, простирающейся до 600-метрового уровня, при этом граница наиболее плотного слоя соответствует высоте 400–450 м с наибольшим градиентом температуры. На береговой линии с наветренной стороны (кривые 2, 5 на рис. 4 или 1 мин полета на рис. 2) заметны прорывы дымовых клубов выше 400-метрового уровня, при этом плотность аэрозоля в этом клубе выше, чем в основном слое. Здесь же наиболее выражен слабый слой на 600-метровой высоте. Максимальные плотности аэрозоля лидар зафиксировал после пересечения наиболее мощного дымового шлейфа (кривые 4, б). Здесь коэффициент ослабления достигает значения 1 км^{-1} . Заметим, что во время пролета на высоте 400 м максимальный коэффициент ослабления, зарегистрированный бортовым нефелометром, достигал $2,2 \text{ км}^{-1}$ в непосредственной близости от источника загрязнений.

При удалении от берега плотность дымового слоя постепенно ослабевает, достигая наименьших значений в точке 8. Фоновый профиль $\epsilon(h)$ характеризуется здесь примерно постоянным (в пределах измерительных погрешностей) значением ϵ на высотах свыше 400 м. Аналогичный профиль получен с наветренной стороны берега (кривая 1, рис. 4, а).

Напомним, что начальные значения коэффициента ослабления брались из нефелометрических измерений как средние за несколько секунд полета в начале каждого круга. При этом фоновые значения ϵ плавно менялись в пределах $0,015 \div 0,024 \text{ км}^{-1}$ на высоте 1600 м (за 23 мин полета) и в пределах $0,028 \div 0,055 \text{ км}^{-1}$ за 25 мин полета на высоте 1000 м, тогда как вертикальные изменения $\epsilon(h)$ на высотах более 600 м, зафиксированные во время снижения самолета, были значительно меньше. В соответствии с этим профили 1 и 8, снятые с наветренной стороны от берега, показывают, что коэффициент ослабления меняется в 2 раза на больших высотах, но почти постоянен ($\epsilon \approx 0,025 \text{ км}^{-1}$) вблизи водной поверхности.

Наши измерения были краткосрочными. Но, очевидно, описанная структура загрязнений существует длительное время. Поэтому интересно оценить интегральное содержание аэрозолей в атмосфере над единицей площади поверхности. Условно эту величину можно назвать осажденной массой аэрозоля $m_{\text{ос}} = \int m(h)dh = \mu \int \epsilon(h)dh$, где m – массовая концентрация. Ве-

личина m_{oc} связана с измеряемой лидаром оптической толщиной τ (по натуральному основанию) соотношением $m_{oc} = \mu\tau$, где μ – коэффициент регрессии массовой концентрации m и коэффициента ослабления излучения ϵ . По данным [5], для широкого класса промышленных загрязнений в атмосфере $\mu = (0,52 \pm 0,34)$ (мг·км)/м³.

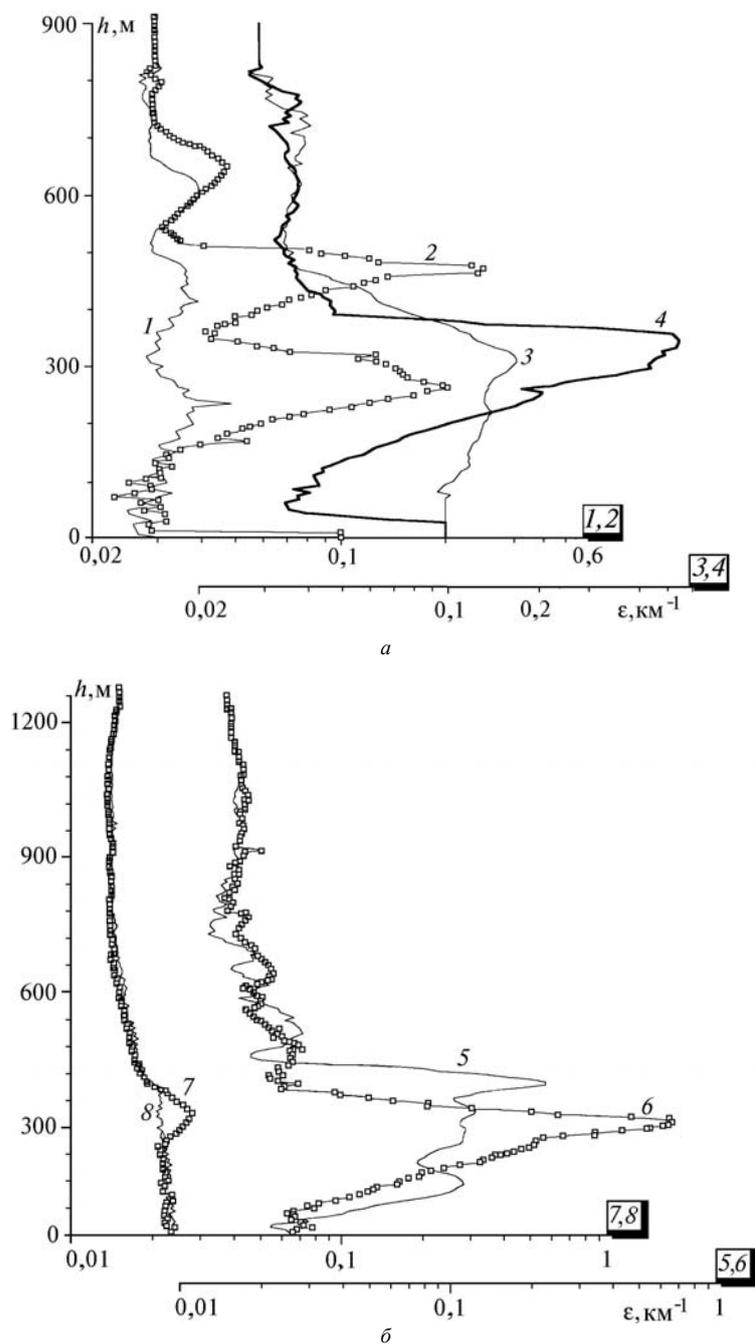


Рис. 4. Вертикальные профили коэффициента ослабления, измеренные при полете на высоте: (а) 1000 м, (б) 1600 м. Номера кривых соответствуют номерам точек на полетных траекториях рис. 1

На рис. 5 приведен горизонтальный профиль мгновенных значений оптической толщи, соответствующий панораме рис. 3. Осажденная масса аэрозоля здесь меняется от 15 до 60 мг/м². Наименьшие значения m_{oc} зафиксированные вдали от берега, составляют 10 мг/м². Логично предположить, что максимальные значения m_{oc} несколько выше в локальных участках вблизи дымовых труб.

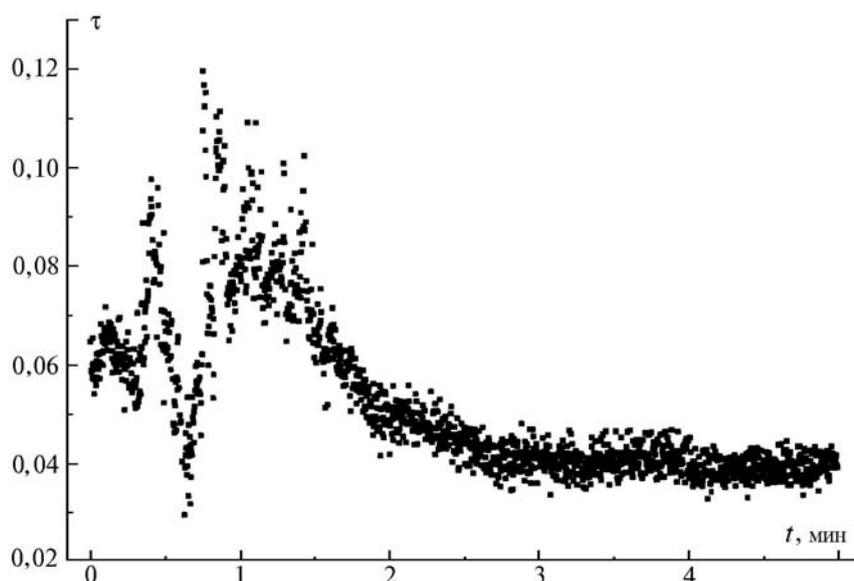


Рис. 5. Горизонтальный профиль оптической толщи τ , соответствующий панораме рис. 3

В целом по итогам эксперимента можно выделить следующие основные моменты:

1. Аэрозольная шапка над ЦБК формируется типичным образом в результате совместного действия температурной инверсии и преобладающего направления ветра.

2. Коэффициент ослабления фонового аэрозоля над акваторией Байкала приблизительно постоянен вплоть до высоты 1,5 км.

3. Измеренная осадочная масса аэрозоля над единичной площадью поверхности составляет $60 \div 100 \text{ мг/м}^2$ в наиболее загрязненных участках над ЦБК и спадает на порядок на расстоянии 10 км от берега.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант N 95-05-16562; Международного научного фонда, грант NY2000; Международного научного фонда и правительства Российской Федерации, грант NY2300.

1. Белан Б.Д., Бурков В.В., Панченко М.В. и др. Некоторые результаты зондирования промышленных выбросов бортовым лидаром «Макрель-2М» // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 2. С. 186–192.
2. Шаманаев В.С., Пеннер И.Э. Наземно-самолетное лазерное зондирование дымов электростанции // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 3. С. 338–345.
3. Зуев В.Е., Антонович В.В., Белан Б.Д. и др. Феномен круговой циркуляции воздуха в котловине озера Байкал // Доклады Академии наук. 1992. Т. 325. N 3. С. 1146–1150.
4. Шаманаев В.С., Абрамочкин А.И. Самолетный поляризационный лазерный локалатор «Светозар-3». Рукопись деп. ВИНТИ 21.08.85 N 6222–85 Деп.
5. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей / Под ред. М.В. Кабанова. Новосибирск: Наука, 1986. 188 с.
6. Панченко М.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г. и др. Методические аспекты самолетных нефелометрических исследований тропосферного аэрозоля в региональном масштабе // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 8. С. 1022–1032.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
26 января 1996 г.

G. P. Kokhanenko, I. E. Penner, V. S. Shamanayev. **Investigation of Aerosol over Baikal Integrated Pulp-and-Paper Mill by Airborne Lidar.**

The laser sounding of the aerosol contamination over the Baikal Integrated pulp-and-paper mill has been conducted by means of airborne lidar. The horizontal and vertical views of the radiation attenuation coefficients have been built for 532 nm wavelength. It is shown that there is from 60 to 100 mg of dust per 1 м^2 at altitudes up to 1,5 km. The contaminants content over Lake Baikal aquatory windward is by an order of magnitude less.