

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501.7 + 551.501.8

Ю.С. Балин, Т.В. Вильде, В.Е. Зуев, Н.П. Красненко, Б.Н. Молчанов, И.А. Разенков, М.Г. Фурсов

ЛАЗЕРНО-АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТЕОУСЛОВИЙ И АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАСЕЙНА г. КЕМЕРОВА

Приведены результаты экспериментальных исследований температурной стратификации пограничного слоя атмосферы и распределения аэрозольных полей, выполненные с помощью акустического локатора и аэрозольного лидара. Проведен анализ степени устойчивости атмосферы в летнее время. Определены статистические характеристики границ температурных инверсий.

Показано, что использование лазерно-акустических средств дистанционного зондирования атмосферы является весьма эффективным для контроля загрязнений воздушного бассейна города.

В последние годы загрязнение атмосферы крупных промышленных центров принимает все большие масштабы, нередко достигая критических значений. Наличие в аэрозолях, входящих в общую массу антропогенных загрязнений, токсичных микроэлементов делает этот тип загрязнителей весьма опасным для здоровья людей.

Существующие системы контроля загрязненности воздушного бассейна основаны на использовании сети наземных датчиков в отдельных точках города с последующим лабораторным анализом. В то же время для проведения конкретных природоохранных мероприятий необходима полная оперативная информация о высотной стратификации метеопараметров и пространственно-временном распределении загрязняющих веществ в атмосфере города по крайней мере до высот 0,5 км. Сюда относятся такие характеристики дымовых шлейфов, как высота подъема, пространственная протяженность в вертикальном и горизонтальном направлениях, массовая концентрация аэрозоля в локальных объемах воздуха возле устья источника и на значительном удалении от него.

Даже при соблюдении промышленными предприятиями норм предельно допустимых выбросов повышение концентрации вредных примесей в нижних слоях атмосферы может быть обусловлено неблагоприятной метеорологической обстановкой, когда отсутствуют значительные вертикальные движения и перемешивание воздуха. Поэтому для оценки степени устойчивости атмосферы, т. е. оценки способности атмосферы рассеивать загрязняющие примеси, необходима оперативная информация о вертикальной температурно-ветровой стратификации атмосферы.

Постановка задачи предопределила состав комплекса измерительных средств экспедиции Института оптики атмосферы СО АН СССР по контролю воздушного бассейна г. Кемерово, где в последнее время регулярно возникала опасная экологическая обстановка, вызванная появлением в весенне-летний период длительных температурных инверсий и, соответственно, способствующая накоплению в нижних слоях атмосферы загрязняющих веществ. Экспедиция проводилась в период с 15–29 июня 1988 г.

В состав комплекса входили лидары для контроля газовых и аэрозольных составляющих загрязнений, акустический локатор и самолет- лаборатория. Исследования с помощью самолета- лаборатория позволили получить общее представление о пространственном распределении аэрозольных полей над городом и в пригородной зоне, а также выбрать район расположения наземных средств, в котором наблюдалась наибольшая загрязненность атмосферы [1].

В настоящей статье представлены некоторые результаты экспедиционных наблюдений о распределении аэрозольных полей, полученные с помощью лидара ЛОЗА-3 [2], и температурной стратификации, контролируемой акустическим локатором МАЛ-2 [3].

Акустический локатор работал в моностатическом режиме, осуществляя зондирование атмосферы на частотах 1; 1,5 и 2 кГц. Высота зондирования составляла 0,5–1 км, пространственное разрешение 34 м, период зондирования 6 с. Регистрация температурной стратификации осуществлялась непрерывно в реальном масштабе времени на факсимильный аппарат.

Один из примеров факсимильной записи результатов зондирования представлен на рис. 1, где по вертикальной оси указана высота, а по горизонтальной — текущее время. Амплитуда принятого акустического сигнала фиксируется пропорциональным почернением записи и определяется интенсивностью температурных неоднородностей.

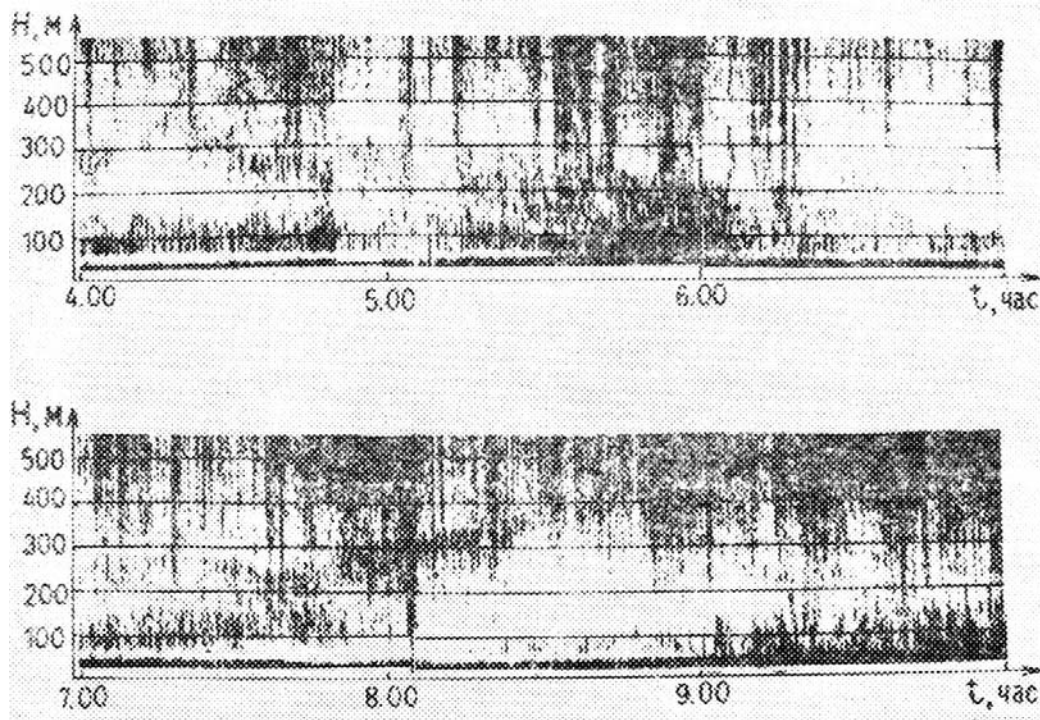


Рис. 1. Пространственно-временная запись температурной стратификации атмосферы в слое 0–500 м, 18.06.88 г.

Уже в момент начала измерений с 4 ч утра наблюдалось наличие двух типов инверсий: приземной — до высоты 150 м (горизонтальный слой почернения) и опускание и подъем приподнятой инверсии (наклоненные слои почернения). После восхода солнца в связи с нагревом почвы начинают развиваться примерно с 8.20 ч конвективные потоки, постепенно достигающие высоты 180–200 м и образующие слой перемешивания. Такие записи позволяют контролировать стратификацию атмосферы и определять неблагоприятные метеорологические условия, способствующие повышенной концентрации загрязнений. Более подробно вопросы интерпретации подобных записей отражены в [3].

На основе полученного экспериментального материала был проведен общий анализ степени устойчивости атмосферы (суммарное время наработки локатора составило 94 ч). За указанный выше период измерений наблюдались различные состояния атмосферы: неустойчивая атмосфера (развитая конвективная турбулентность), безразличная (градиент температуры окружающего воздуха примерно равен сухадиабатическому вертикальному градиенту), устойчивая (приземные и приподнятые инверсии температуры или оба типа инверсий одновременно). Классификация этих состояний атмосферы в процентном отношении к общему количеству измерений показана на рис. 2.

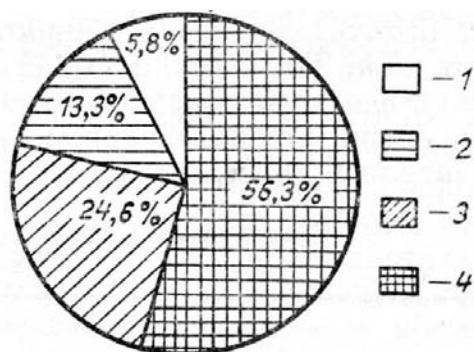


Рис. 2. Классификация температурной стратификации атмосферы: 1 — безразличная стратификация; 2 — конвективный режим; 3 — приземные инверсии; 4 — приподнятые инверсии или оба типа инверсий

Как видно из представленного материала, количество случаев образования инверсий температуры, приводящих к условиям устойчивой стратификации, т. е. к условиям накопления примесей, составляет около 81% всего материала наблюдений. Из них количество случаев, связанных с наличием приподнятых инверсий, когда создаются наиболее неблагоприятные метеорологические условия, превышают 50%. Основной характеристикой температурных инверсий, как известно, является значение

высоты ее границ. При фиксированных высотах источников загрязнений появление инверсий на разных высотах относительно горловины труб будет оказывать различное действие на процесс накопления антропогенных веществ в атмосфере.

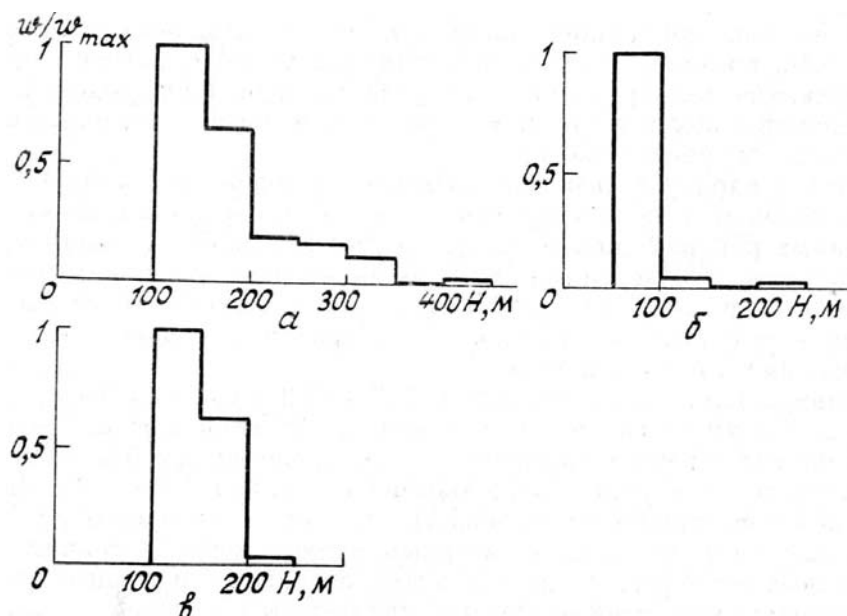


Рис. 3. Гистограммы распределений границ температурных инверсий: *a* — верхняя граница приподнятой инверсии; *б* — нижняя граница приподнятой инверсии; *в* — верхняя граница приземной инверсии

На рис. 3 показаны нормированные гистограммы распределений верхней и нижних границ приподнятых инверсий, а также верхней границы приземной инверсии. Из представленных гистограмм (рис. 3, *a*) видно, что в указанный период наблюдений верхняя граница приподнятых инверсий всегда находилась выше 100 м, и хотя в большинстве случаев она лежит в диапазоне высот 100÷200 м, но может достигать и 500 м. Распределение значений высот нижней границы приподнятой инверсии (рис. 3, *б*) в основном сосредоточено в значительно более узком интервале 50÷100 м. Верхняя граница приземной инверсии, как правило, не превышает 200 м. Результаты статистической обработки значений границ всех типов инверсий представлены в таблице. Следует отметить, что при обработке данных не был охвачен диапазон высот ниже 50 м, поскольку эта величина соответствует «мертвой зоне» акустического локатора. В связи с этим приподнятые температурные инверсии, нижняя граница которых находилась ниже 50 м, условно считались приземными.

Статистические характеристики границ температурных инверсий, г. Кемерово, июнь 1988 г.

Параметр	Средняя высота, м	Среднеквадратическое отклонение, м	Коэффициент вариации, %
Верхняя граница приподнятой инверсии	161,9	62,1	38
Нижняя граница приподнятой инверсии	80,6	38,6	48
Верхняя граница приземной инверсии	136,6	26,7	20

Представленные в таблице результаты показывают, что средняя мощность приподнятой инверсии за период наблюдений составила ~ 81,3 м. При этом положение ее границ характеризуется большей нестабильностью по отношению к приземной инверсии.

Таким образом, общий анализ состояний устойчивости атмосферы г. Кемерово позволяет сделать однозначный вывод о высоком проценте существования температурных инверсий за период наблюдения, о малых значениях высот их границ при относительно стабильном пространственном расположении.

Все это наряду с низкими высотами горловин труб (50—120 м) во многом объясняет неблагоприятную экологическую обстановку в промышленных районах города, когда дымовые шлейфы сдерживаются температурными инверсиями, тем самым способствуя повышению концентрации загрязнителей в приземных слоях атмосферы. Это подтверждается и результатом лазерного зондирования аэрозольных полей промышленного происхождения.

Сканирующий лазерный локатор ЛОЗА-3 располагался на расстоянии 1,2–1,5 км от группы источников загрязнений и осуществлял зондирование атмосферы с частотой 6 Гц на длине волны 0,53 мкм. В азимутальном секторе угол обзора обычно составлял 100–130°. При зондировании в вертикальной плоскости угол места не превышал 30–50°, что соответствовало захвату лазерным пучком верхних границ подъема дымовых шлейфов. В дневное время оператор с помощью телевизионной камеры мог непосредственно наблюдать исследуемое поле аэрозоля, визуальнo задавая границы секторов обзора.

Система управления лидара, регистрации и обработки данных зондирования создана на базе МикроЭВМ «Электроника-60» с развитой конфигурацией периферийных устройств. В зависимости от конкретных задач эксперимента программа управления допускает ряд режимов работы. При проведении описываемого эксперимента оператором в память ЭВМ заносятся границы секторов обзора и требуемое угловое разрешение, которое достигает 0,1°. При сканировании, в момент достижения заданных углов, осуществляется запуск лазера, и непосредственная картина разрезов атмосферы фиксируется в памяти ЭВМ на равномерной градусной сетке. Время получения горизонтальных разрезов в секторе 100° с угловым разрешением 1° и пространственным разрешением 10–20 м составляет около 15 с. Затем информация обрабатывается на ЭВМ и выводится с помощью матричного печатающего устройства в виде карт пространственного распределения коэффициентов рассеяния (массовой концентрации) аэрозоля.

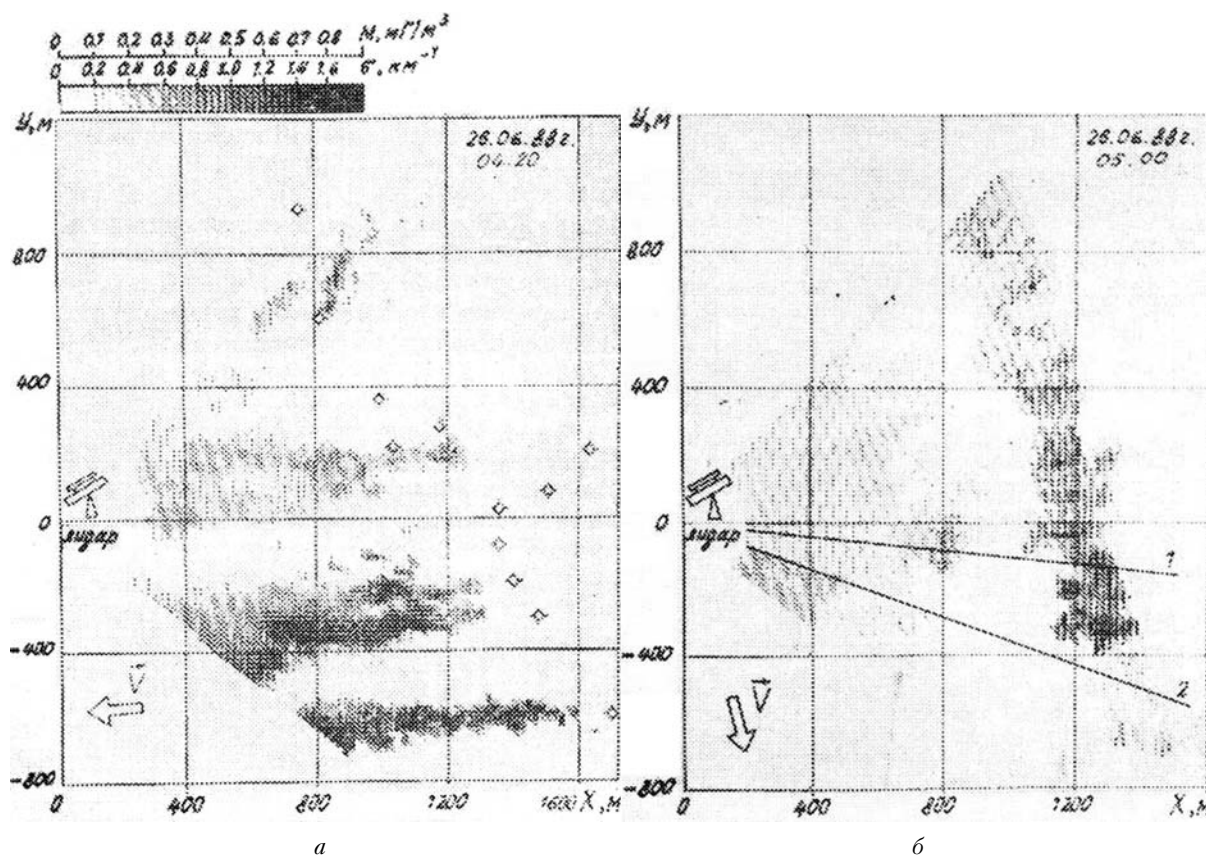


Рис. 4. Горизонтальный разрез аэрозольного поля по данным лидара «ЛОЗА-3». Угловое разрешение 1°, пространственное разрешение – 20 м, V – направление ветра, \odot – трубы, M – массовая концентрация аэрозоля, σ – коэффициент рассеяния

Всего за период измерений было получено порядка 60 горизонтальных и вертикальных разрезов аэрозольного поля. На рис. 4 изображены типичные примеры пространственного распределения аэрозольных полей, полученные под углом места 6° при сканировании в горизонтальной плоскости с угловым разрешением 1° и пространственным разрешением 20 м. На рис. 4, *a* представлена только та часть сектора обзора с раскрывом 60°, в котором сосредоточено основное количество источников загрязнений. Это обусловлено в основном наглядностью имеющегося материала, поскольку в реализуемой в тот день (27.06.88 г.) метеоситуации поле аэрозоля под действием ветра сносилось в сторону лидара. Здесь же схематично показано пространственное положение источников загрязнений, определенное с помощью лидара. В такой ситуации, а также когда направление ветра противоположно, можно с уверенностью «привязать» каждый конкретный источник к своему дымовому шлейфу. Процесс «привязки» гораздо сложнее, если направление ветра близко к линии расположения перекрывающих друг друга источников. Это иллюстрируется рис. 4, *б* (26.06.88 г.), где сечение аэрозольного поля получено при тех же границах угловых секторов. Приведенные разрезы были получены в ут-

ренные часы, которые характеризовались слабым ветром и наличием инверсий температуры. На рис. 5, а, б показаны вертикальные разрезы (сечения 1 и 2 рис. 4, б) в условиях существования приземной инверсии температуры до высоты ~ 180 м. Факсимильная запись температурной стратификации атмосферы, полученная акустическим локатором, представлена в левой части рисунков. В условиях большого отрицательного градиента температуры атмосфера очень устойчива, турбулентный обмен слаб и дымовой шлейф должен оставаться примерно на одной высоте, определяемой высотой инверсии. Это подтверждается результатами, представленными на рис. 5. В то же время на дистанциях ~ 1000—1200 м, в зоне расположения источников загрязнений наблюдается несколько иная картина. Тепло, выделяемое предприятиями в промышленной зоне, локально изменяет температурную инверсию и способствует подъему выбросов вплоть до высот 300 м. Одновременно в указанной зоне наблюдается увеличение концентрации аэрозоля и в нижних слоях атмосферы.

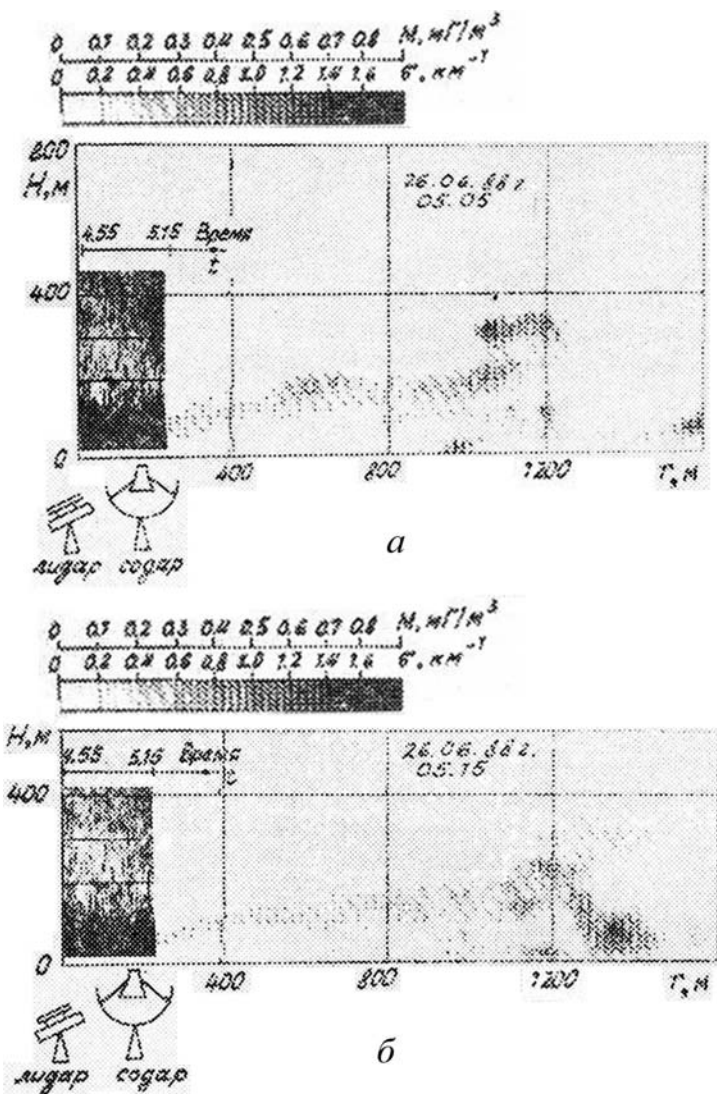


Рис. 5. Вертикальный разрез аэрозольного поля по данным лидара «ЛОЗА-3» в условиях приземной температурной инверсии (запись слева), фиксируемой акустическим локатором (содаром): а — для сечения 1 рис. 4, б, в — для сечения 2

На всех рисунках распределение аэрозольного поля изображено по градациям почернения изображенных графически коэффициентов рассеяния (массовой концентрации). Шкала градаций представлена в верхней части рисунков.

Как известно, при лидарном зондировании аэрозольных полей, особенно промышленного происхождения, существуют две основные методические проблемы. Первая из них состоит в правильном выборе существующих или в разработке новых алгоритмов обработки лидарных сигналов для восстановления оптических параметров аэрозольного поля.

Наибольшее применение в практике, по крайней мере при восстановлении оптических параметров вдоль трассы зондирования, нашел метод Клетта [4]. Метод основан на введении априорно задаваемой информации о коэффициенте рассеяния на конечном участке трассы зондирования. Примени-

тельно к рассматриваемой задаче попытка использовать данный метод привела к неудаче. Была получена явно нефизичная картина аэрозольного поля в виде чередующихся радиальных «черных и белых полос» концентрации аэрозоля, что обусловлено существенно неоднородным распределением коэффициента рассеяния по дуге сектора обзора.

Для получения достоверных результатов обработки лидарных сигналов были использованы оптимальные помехоустойчивые алгоритмы, разработанные на основе статистического подхода к задаче интерпретации лидарных данных [5].

Более подробное рассмотрение этой проблемы выходит за рамки настоящей статьи и требует специального анализа.

Вторая не менее важная проблема заключается в оценке массовой концентрации аэрозоля на основе информации о его оптических параметрах. В монографии [6], где теоретически и экспериментально исследован коэффициент μ связи между этими характеристиками, показано, что в реальных условиях можно ожидать значительных вариаций $\mu = (0,52 \pm 0,34) \text{ мг} \cdot \text{км}/\text{м}^3$. Главную роль здесь, по-видимому, играет специфика аэрозоля, обусловленная его микрооптическими и микрофизическими характеристиками. Тем не менее в обзорной работе [7] на основе анализа исследований различных промышленных дымов отмечается высокая корреляция ($R > 0,9$) между оптической плотностью и весовой концентрацией аэрозоля для каждого отдельно взятого источника выбросов. Более того, для некоторых типов дымов коэффициент μ остается практически постоянным при различных метеорологических условиях. Это характерно для дымов, в которых средний радиус аэрозольных частиц соответствует параметру Ми $1 < \rho < 3 \div 6$, а также для дымов, содержащих слабодиффракционные частицы.

Поэтому для практического решения поставленной задачи по оценке массовой концентрации из оптических измерений в каждом конкретном случае необходимы предварительные эмпирические исследования или по крайней мере классификация типа аэрозоля от контролируемых источников выбросов (цемент, тип топлива и т.д.).

В заключение можно сделать вывод, что использование лазерноакустических средств дистанционного зондирования атмосферы является весьма эффективным для контроля загрязнений воздушного бассейна города.

При этом лазерный локатор контролирует непосредственно распределение аэрозольных примесей в атмосфере на больших пространственных площадях, а акустический локатор, контролируя состояние атмосферы, позволяет оперативно в реальном времени следить за ее устойчивостью, определять границы температурных инверсий и этим облегчать прогноз неблагоприятных метеорологических условий, способствующих загрязнению воздуха.

1. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Задде Г.О. и др. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 6. С. 636–641.
2. Балин Ю.С., Байрашин Г.С., Бурков В.В. и др. // Проблемно-ориентированные измерительно-вычислительные комплексы. Новосибирск: Наука, 1986. С. 65–71.
3. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. 167 с.
4. Klett J.D. // Appl. opt. 1983. Т. 22. № 4. С. 514–517.
5. Креков Г.М., Кавкьянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 184 с.
6. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1986. 188 с.
7. Уваров Д.Б., Жуков Г.П. // Тр. Института экспериментальной метеорологии. 1976. Вып. 15 (60). С. 100–117.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
15 февраля 1990 г.

Yu.S. Balin, T.V. Vil'de, V.E. Zuev, N.P. Krasnenko, B.N. Molchanov, I.A. Razenkov, M.G. Fursov. **Laser and Acoustic Studies of Meteorological Situations and Aerosol Contamination in the Atmosphere over Kemrovo City.**

The paper presents some results of experimental study of temperature stratification of the ground atmospheric layer and aerosol fields carried out using a sodar and a Mie Rayleigh scattering lidar. Using these data the analysis of atmospheric stability in summer period has been made. Statistical characteristics of the temperature inversion boundaries were also determined.

The laser and acoustic facilities for remote air control were shown to be quite efficient for monitoring air pollutions in the atmosphere over an industrial center.