

**Ю.С. Балин, И.А. Разенков**

## **ЛАЗЕРНЫЙ КОНТРОЛЬ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ**

Приведено описание сканирующего одночастотного аэрозольного лидара, в котором система управления, регистрации и обработки информации разработана на базе персональной ЭВМ. Рассмотрена проблема обработки лидарных сигналов при наличии аппаратных шумов. Представлены примеры использования лидара для контроля пространственно-временного распределения аэрозольных загрязняющих полей, а также определения интенсивности выбросов из труб локальных источников загрязнений.

### **Введение**

В последние годы загрязнение атмосферы крупных промышленных центров принимает все большие масштабы, достигая во многих случаях критических значений.

Как известно, основными элементами существующих автоматизированных систем контроля воздушного бассейна городов являются наземные стационарные посты или мобильные станции, которые не могут в должной мере обеспечить потребности практики ни по пространственному, ни по временному разрешению.

В то же время для проведения конкретных природоохранных мероприятий необходима максимально полная оперативная информация о пространственно-временном распределении загрязняющих веществ в воздушном бассейне, по крайней мере до высот  $0,5 \div 1$  км, о количестве вредных веществ, выбрасываемых локальными источниками в атмосферу в единицу времени.

Кроме того, повышение концентрации примесей в атмосфере во многом определяется метеорологическим потенциалом, и в первую очередь вертикальной температурно-ветровой стратификацией атмосферы, которую также необходимо оперативно контролировать.

Перечисленным требованиям в полной мере отвечают дистанционные средства лазерного зондирования атмосферы – лидары. Первые применения лидаров для контроля распространения загрязнений были описаны еще в 1972 году [1], а впоследствии обобщены в [2]. В отечественной литературе проблема использования лидаров для диагностики аэрозольных загрязнений наиболее полно освещена в монографии [3].

В данной статье приводятся результаты исследований систем экологического дистанционного мониторинга, полученные в Институте оптики атмосферы за последнее время.

### **Аппаратура дистанционного контроля аэрозольных загрязнений**

В серии аэрозольных лидаров, разрабатываемых в Институте оптики атмосферы, есть лидары типа «ЛЮЗА», постоянная модернизация которых позволяет проследить основные направления развития подобного рода устройств.

Базовым устройством в этой серии является лидар «ЛЮЗА-3» [3]. Поскольку общая компоновка конструкции лидара за последнее время не претерпела существенных изменений, то опустим подробное описание конструкции комплекса, которое можно найти в [3].

Все оборудование лидара размещено в кабине автофургона с системой обеспечения микроклимата, что обеспечивает нормальное функционирование лидара как в летнее, так и в зимнее время. Приемопередатчик представляет собой единый блок, установленный на электромеханической сканирующей поворотной колонке. Сверху приемопередатчик закрыт металлическим куполом, предохраняющим его от неблагоприятных атмосферных воздействий.

При сканировании в азимутальных направлениях купол вращается на опорном подшипнике синхронно с приемопередатчиком. Излучающая головка лазера и телевизионная камера обзора исследуемого пространства установлены симметрично с двух сторон от приемного телескопа. Блок питания и охлаждения лазера размещены в основании поворотной сканирующей колонки.

Аэрозольный лидарный комплекс относится к классу обзорно-поисковых измерительных систем и поэтому должен соответствовать определенной совокупности эксплуатационно-технических характеристик, основные из которых приведены в табл. 1. Одним из главных требований, предъявляемых к лидару, как средству для оперативного получения карт пространственного распределения загрязняющих веществ и оценки интенсивности выбросов от локальных источников, является обеспечение требуемой пространственной разрешающей способности. Пространственная разрешающая способность лидара определяется разрешающей способностью аппаратуры по дальности и по угловым координатам. Очевидно, что первая составляющая в основном определяется характеристиками приемопередающего блока и частотными свойствами измерительного тракта лидара. Угловая разрешающая способность зависит от угловой расходимости передатчика, а также определяется точностными характеристиками системы управления сканирующей колонки лидара.

Т а б л и ц а 1

Основные тактико-технические показатели лидара «ЛОЗА-3»

Показатель	Размерность	Численное значение
Дальность и направление зондирования:		
дальность зондирования дымовых шлейфов	км	5–7
угол места	град	– 10÷90
азимут	град	0÷340
пространственное разрешение	м	7,5
угловое разрешение	угл. мин	10
Приёмопередатчик		ЛТИ-405
Излучатель:		
длина волны	мкм	0,532
энергия в импульсе	мДж	25
частота повторения импульсов	Гц	20
длительность импульса	нс	15
апертура коллиматора	мм	100
Приёмник:		
апертура приёмного объектива	мм	300
ширина полосы пропускания интерференционного фильтра	нм	3
фотоприёмник	–	ФЭУ-84
телевизионный визир	–	КТП-63
Система управления и регистрации:		
ЭВМ		IBM PC/AT
Аналого-цифровой преобразователь (АЦП):		
разрядность		8
тактовая частота	МГц	20
максимальная амплитуда входных сигналов	В	1
объём ОЗУ	кБайт	1 (1024 отсчета по дальности)
Условия эксплуатации:		
температура	°С	–20÷40
влажность	%	95
давление	ГПа	800±1000
режим работы	–	круглосуточный циклический
Масса лидара/масса аппаратуры	кг	6500/1000
Электропитание	–	220/380 В; 50 гц; 5 квт

Именно в улучшении этих характеристик рассматриваемый лидар претерпел существенную модернизацию по сравнению с ранее используемым [3]. Эти отличия касаются в основном системы регистрации и управления лидаром, которая разработана на базе персонального компьютера – IBM PC/AT.

Устройство цифровой регистрации лидарных сигналов выполнено в стандарте этого компьютера и устанавливается непосредственно в блоке процессора. Контролер разработан на основе 8-разрядного аналого-цифрового преобразователя K1107ПВ2 и выполняет следующие функции: синхронную оцифровку лидарного сигнала; запоминание и хранение цифровой информации; выдачу в канал компьютера произвольной выборки из лидарного сигнала.

ла; программную регулировку смещения нуля аналого-цифрового преобразователя; управление угломестными приводами сканирующей колонки лидара.

В качестве первичных датчиков используются индукционные вращающиеся трансформаторы ВТ-5, установленные через паразитные передачи на выходных валах поворотной колонки. Датчики работают в режиме фазовращателей и обеспечивают преобразование «угол–фаза–код» с погрешностью менее 5'.

Темп работы всех составляющих блоков лидара (частота посылок лазера, скорость вращения поворотной колонки, зондирование в необходимых секторах пространства, частота оцифровки лидарных сигналов и скорость записи в память ЭВМ, частота оцифровки и синхронизация угломестных датчиков) жестко связан между собой и контролируется с помощью встроенного в систему управления резидентного микрокомпьютера на базе однокристалльной ЭВМ.

Описываемый лидар осуществляет два вида работ. Первый из них имеет режим ручного сканирования, когда перемещение зондируемого объекта непредсказуемо и его необходимо отслеживать с помощью телевизионной системы обзора. Оператор с помощью системы управления обеспечивает поворот колонки с заданной скоростью в требуемых секторах горизонтального и вертикального обзоров. В этом случае при каждом выстреле лазера в память ЭВМ с угломестных датчиков заносится информация о направлении зондирования, а также оцифрованные значения лидарных сигналов от контролируемых атмосферных объектов. Второй вид работ – это полная автоматизация измерений по заранее заданной программе. Он имеет два основных режима – позиционирование и секторное сканирование. В режиме позиционирования по командам (Азимут, Угол места, Скорость), вводимым оператором с клавиатуры компьютера, оптическая ось приемопередатчика лидара устанавливается в заданную точку и удерживается в этом направлении во время процесса зондирования. Этот режим часто применяют при зондировании шлейфов от локальных источников загрязнений с целью измерения интенсивности выбросов.

Одна из возможностей лидара заключается в том, что в память ЭВМ можно занести информацию о местоположении всех находящихся в полосе обзора труб источников выбросов. Это позволяет с максимально возможным пространственно-временным разрешением производить поочередное зондирование дымовых шлейфов от каждого отдельно расположенного источника.

В режиме секторного сканирования траектория перемещения оптической оси локатора, т.е. растр, также задается оператором с клавиатуры ПЭВМ и имеет формат: «Азимут А1, Угол места М1, Азимут А2, Угол места М2, Шаг, Скорость». Здесь (А1, М1) и (А2, М2) – соответственно координаты начальной и конечной точек обследуемого сектора пространства, шаг – угловое разрешение между соседними направлениями трасс зондирования (на практике не менее 1°).

Этот режим используют при обследовании общей картины распределения загрязнений в воздушном бассейне города, когда картирование производится путем получения нескольких азимутальных сечений под разными углами места. Выбор последних осуществляется на основании требуемого углового разрешения между смежными азимутальными сечениями, а также реализуемой в конкретной ситуации максимальной высотой подъема аэрозольных загрязнений. Как показывает наш опыт, для представления полной картины распределения аэрозольных загрязнений промышленного района достаточно 5÷10 сечений.

В режиме секторного сканирования возможен вариант, когда лидар зондирует атмосферу в нескольких вертикальных плоскостях под различными азимутальными углами. Цель этих измерений – зафиксировать с улучшенным пространственным разрешением вертикальное распределение аэрозольных загрязнений до максимально возможных высот в зонах с повышенной концентрацией.

Каждый акт зондирования формируется в отдельный файл данных, ему присваивается порядковый номер, который соответствует паспорту выстрела с записью времени проведения измерений и других технических параметров.

Во время проведения экспериментов синхронно с лидарными измерениями с помощью телевизионной камеры на видеоманитовон записывается визуальная информация, что обеспечивает получение дополнительных материалов для дальнейшей интерпретации данных зондирования.

Применение персональной ЭВМ в составе комплекса позволило полностью автоматизировать процесс измерений (в том числе управление работой лидара, вычисление измеряемых атмосферных параметров непосредственно в процессе измерений), обеспечить наглядность получаемой информации и осуществить ее архивацию.

### Методика измерений оптико-физических параметров аэрозольных полей и интенсивности выбросов

В основе интерпретации данных лазерного зондирования аэрозольных полей лежит уравнение лазерной локации, связывающее мощность принимаемого сигнала с оптическими параметрами атмосферы:

$$P(z) = AG(z) z^{-2} \beta(z) \exp\left\{-2 \int_0^z \alpha(z') dz'\right\}, \quad (1)$$

где  $P(z)$  – принимаемый сигнал, обусловленный рассеянием лазерного излучения в направлении лидара;  $z$  – расстояние до рассеивающего объема по трассе зондирования;  $A$  – аппаратная постоянная лидара;  $G(z)$  – геометрическая функция лидара, определяемая угловыми диаграммами приемопередатчика;  $\alpha(z)$  и  $\beta(z)$  – соответственно объемные коэффициенты общего и обратного рассеяния.

Как видно из уравнения (1), принимаемый лидарный сигнал содержит в лучшем случае два неизвестных параметра  $\alpha(z)$  и  $\beta(z)$ . Поэтому для разрешения уравнения относительно одного из параметров, например  $\alpha(z)$ , необходимо доопределить задачу. В зависимости от количества и качества имеющейся априорной информации об атмосфере возможны различные варианты доопределения уравнения локации и соответственно различные методы его решения. Здесь не ставится задача описать все возможные приемы решения уравнения, тем более, что достаточно полные обзоры по этому вопросу изложены в [3÷5].

В практике лазерного зондирования наиболее широкое распространение нашли методы, основанные на аналитическом решении уравнения зондирования [3, 4]. Среди них наиболее подходящими для решения поставленной проблемы являются метод «асимптотического сигнала» и метод, основанный на калибровке сигнала, взятого обычно на конце трассы, к известному коэффициенту ослабления. (Хотя впервые эффективность последнего метода была показана в отечественной литературе [6, 7], тем не менее после публикации в [8] распространение он получил под названием «метод Клетта»). К достоинствам этих методов следует отнести отсутствие необходимости в абсолютной калибровке лидара.

Не останавливаясь на трудностях методического характера, которые достаточно полно освещены в [3], в данном разделе рассмотрим влияние аппаратных шумов при реализации «метода Клетта», а также некоторые пути уменьшения их воздействия на погрешность восстанавливаемых оптических параметров.

Аппаратурные недостатки лидара проявляются прежде всего при регистрации эхосигналов аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), имеющими ограниченную разрядность и, следовательно, ограниченную точность оцифровки сигналов. В нашем случае, при использовании восьмиразрядного АЦП, имеем 256 дискретов амплитуды сигнала.

Специфической особенностью лидарных сигналов, согласно (1), является их резкое убывание по квадратичному закону по мере увеличения дистанции. Поэтому для локаторов среднего радиуса действия (типа «ЛЮЗА-3») величина эхосигнала на удалениях более 2÷3 км может не превышать 5÷10 дискретов АЦП даже от локальных, достаточно плотных аэрозольных образований. Методы обращения лидарных данных используют, как правило, не сам сигнал  $P(r)$ , а некоторую  $S$ -функцию, равную  $S(z) = P(z) z^2$ . Наличие случайных шумов в совокупности с ограниченной точностью регистрации приводит к заметным искажениям  $S$ -функции и, как следствие, к существенным ошибкам восстановления  $\alpha(z)$ , которые на конце трассы могут составить сотни процентов.

Сказанное иллюстрируется рис. 1 и 2, где на первом приведены результаты натуральных измерений аэрозольных загрязняющих полей с использованием лидара «ЛЮЗА-3».

В верхней части рис. 1 показано регистрируемое поле эхосигналов  $P(z)$ , в нижней части – результаты восстановления с использованием метода Клетта. Точка  $O$  – это место располо-

жения лидара. Как видно из рисунка, получена явно не физическая картина аэрозольного поля в виде чередующихся «черных и белых полос» концентрации аэрозоля.

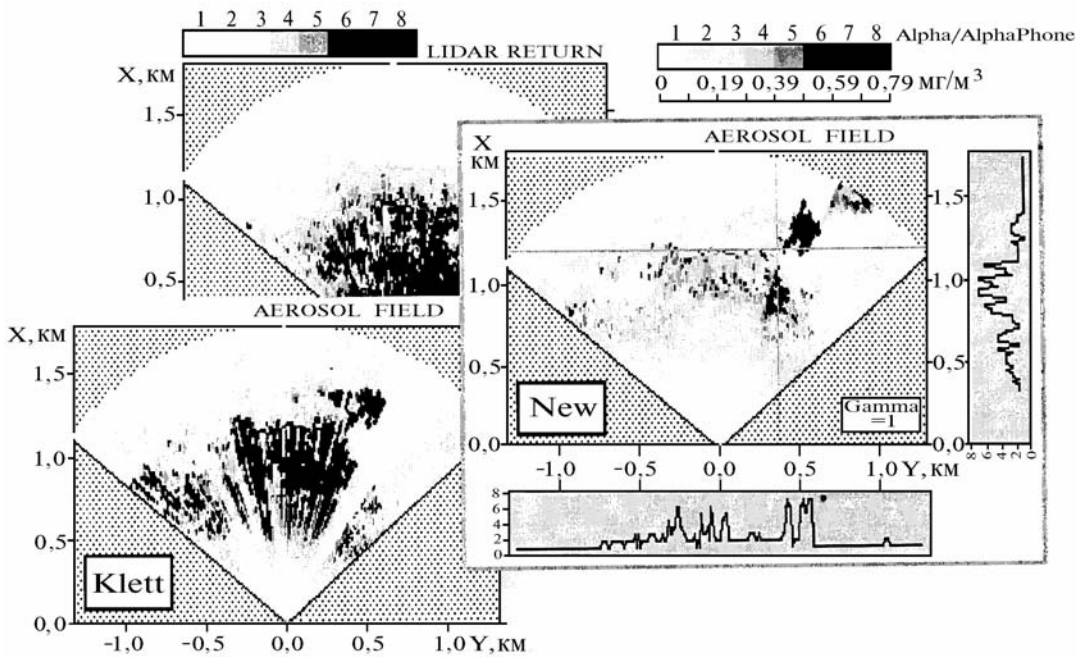


Рис. 1. Сопоставление результатов восстановления оптико-физических параметров аэрозольных полей из экспериментальных данных различными методами

Такой же вывод следует из рассмотрения данных численного моделирования, представленных на рис. 2, а. Модельный профиль коэффициента рассеяния представлял собой однородный фоновый профиль ( $\alpha(z) = 0,2 \text{ км}^{-1}$ ), на который на дистанциях 1, 2 и 3 км были наложены три пика, соответствующие аэрозольным образованиям шириной 200 м. Максимальное значение коэффициентов рассеяния этих образований превышало фоновое в 8 раз. На рисунке значение коэффициентов показано в виде их отношения по оси ординат.

Расчет сигналов  $F(z)$  и  $S(z)$  проводился согласно уравнению (1) с аддитивным добавлением «белого» шума, причем сигнал  $F(z)$  нормировался таким образом, что максимум сигнала был равен максимальному коду АЦП, т.е. с использованием полного динамического диапазона преобразователя. Моделирование шума осуществлялось на ЭВМ с помощью датчика случайных чисел, при этом экстремальное значение шума соответствовало  $\Delta N = 4$ . Из рис. 2, а ясно видны отклонения восстанавливаемых значений  $\alpha(z)$  на первой половине трассы от модельных (примерно в два раза) и полная потеря информации на конечных участках.

С целью устранения подобных недостатков предлагается модификация метода, суть которой заключается в следующем.

Вводится некоторое значение порога сигнала  $\Delta P$ , равное или большее, чем код АЦП, соответствующий шумовой «дорожке» (сигнал на больших удалениях от лидара). Тогда в дальнейшем сигнал ниже уровня порога  $\Delta P$  не фиксируется, а соответствующая этим дальностям  $S$ -функция экстраполируется.

$$S^m(z) = \begin{cases} \frac{P(z) z^2}{G(z)}, & \text{при } P(z) \geq \Delta P \\ \frac{\Delta P z^2}{G(z)} \exp\left\{-2 \int_{z_{II}}^z \alpha^{m-1}(z') dz'\right\}, & \text{при } P(z) < \Delta P, \end{cases} \quad (2)$$

где  $m = 1, 2, 3, \dots$

Здесь индекс  $m$  – номер итерации;  $Z_n$  – дистанция, начиная с которой амплитуда сигнала становится меньше порога  $\Delta P$ .

В случае зондирования дымовых шлейфов возможно неоднократное превышение сигнала над уровнем шума, но это не ограничивает применение предлагаемой процедуры обработки. В качестве первой итерации можно взять  $\alpha(z)$ , равное его фоновому значению, а сама итерационная процедура описывается следующим соотношением:

$$\alpha^m(z) = \frac{S^m(z)}{\frac{S^m_{z_k}}{\alpha_k} + \int_z^{z_k} S^m(z') dz'} \quad (3)$$

где  $S_k$  и  $\alpha_k$  – соответственно  $S$ -функция и коэффициент рассеяния на конце трассы, который обычно полагают равным фоновому значению.

Соотношение (3) сводится к методу Клетта в его обычном виде при  $\Delta P = 0$ ,  $m = 1$ .

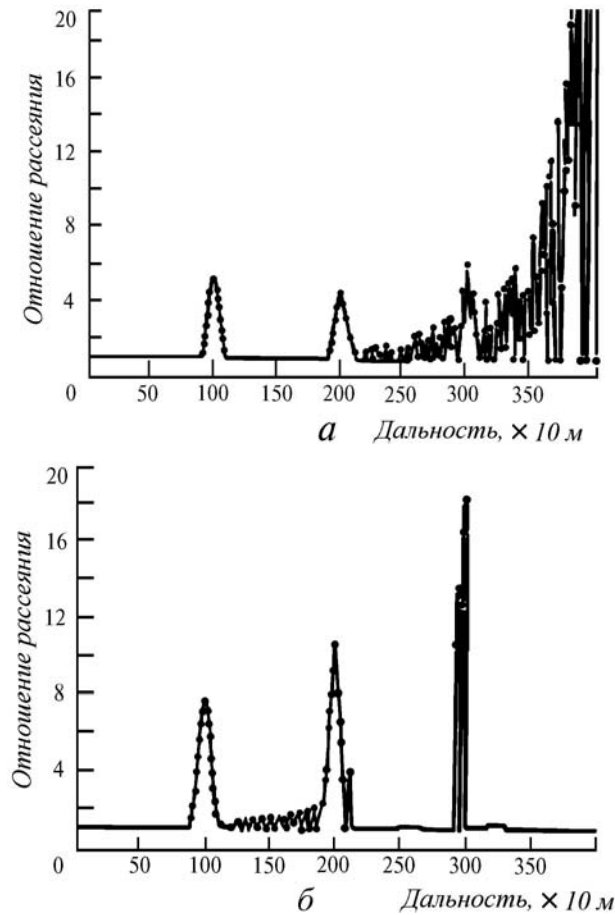


Рис. 2. Сопоставление результатов модельных расчетов восстановления профилей коэффициента рассеяния различными методами: *a* – метод Клетта, шум  $\Delta N = 4$ ; *б* – итерационный метод, шум  $\Delta N = 4$ , порог  $\Delta P = 5$

Результаты применения описанной процедуры для обработки тех же модельных сигналов представлены на рис. 2, *б*. Поскольку код шума  $\Delta N = 4$ , то значение порога  $\Delta P$  было выбрано равным пяти. Вычисления были прерваны на пятой итерации, когда результаты расчетов интегралов коэффициента рассеяния по трассе стали отличаться менее чем на 1%. Рассмотрение графиков свидетельствует о существенном уменьшении погрешностей восстанов-

ления коэффициентов рассеяния. При моделировании была реализована также ситуация, когда порог  $\Delta P$  был выбран достаточно большим и произошла «потеря» сигнала от третьего аэрозольного образования на конце трассы. Тем не менее это обстоятельство не повлияло на погрешности восстановления  $\alpha(z)$  на предыдущих участках трассы.

Эффективность описанной процедуры обработки сигналов была подтверждена также при натурных измерениях. Это наглядно демонстрирует вид аэрозольного разреза, представленного в правой части рис. 1.

Следующий важный шаг в проблеме интерпретации данных зондирования заключается в оценке массовой концентрации аэрозоля на основе информации о его оптических параметрах. Вообще говоря, соотношения типа коэффициент ослабления – концентрация определяются сложной зависимостью от состава частиц, их форм и распределения по размерам. В [3], где теоретически и экспериментально исследован коэффициент связи  $\mu$  между этими характеристиками, показано, что в реальных условиях следует ожидать значительных вариаций  $\mu = (0,52 \pm 0,34) \text{ мг/км/м}^3$ . Главную роль здесь, по-видимому, играет специфика аэрозоля, обусловленная его микрооптическими и микрофизическими характеристиками [2]. Тем не менее в обзорной работе [9] на основе анализа исследований различных промышленных дымов отмечается высокая корреляция между оптической плотностью и весовой концентрацией аэрозоля для каждого отдельно взятого источника выбросов. Более того, для некоторых типов дымов коэффициент  $\mu$ , остается практически постоянным при различных метеорологических условиях. Это характерно для дымов, в которых средний радиус аэрозольных частиц соответствует параметру  $Mi$   $1 < \rho < 3 \div 6$ , а также для дымов, содержащих слабодиффракционные частицы.

Поэтому для уменьшения погрешности оценки массовой концентрации из оптических измерений в каждом конкретном районе необходимы предварительные эмпирические исследования или по крайней мере классификация типа аэрозоля в зависимости от вида источника загрязнений.

До сих пор речь шла о картировании аэрозольных загрязнений по уровню предельно допустимых концентраций (ПДК,  $\text{мг/м}^3$ ). Другим важным параметром, применяемым в экологическом контроле, является интенсивность выброса загрязнений, т.е. количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу в единицу времени ( $\text{г/с}$ ).

Оценить величину интенсивности выброса с использованием лидара можно различными способами. Один из них заключается в азимутальном сканировании в приземном слое атмосферы по трассам, перпендикулярным направлению распространения шлейфа. Определяя на этих трассах экстремумы оптической толщи, можно по соотношениям, полученным в [10], осуществить оценку интенсивности выброса. Дополнительно для этого необходимо иметь информацию о поле скорости ветра, коэффициентах турбулентной диффузии, скорости выпадения частиц различных фракций. Ясно, что практическая реализация предложенной методики довольно затруднительна. Это обуславливается большим количеством дополнительно измеряемых параметров, и тем, что на оптическое состояние приземного слоя атмосферы влияет множество других источников загрязнений.

Другой способ заключается в непосредственном зондировании самого дымового шлейфа, с получением полного сечения либо в вертикальной, либо в горизонтальной плоскостях. В дальнейшем, для определенности, будем рассматривать случай сканирования в вертикальной плоскости.

Из простых соображений нетрудно получить следующее соотношение для оценки интенсивности выброса  $B(\text{г/с})$ :

$$B = V \mu \cos \varphi \int_S \alpha(S') dS', \quad (4)$$

где  $V$  – скорость переноса аэрозоля в шлейфе,  $S$  – сечение шлейфа в вертикальной плоскости,  $\alpha(S)$  – двумерная функция распределения коэффициента рассеяния на плоскости  $S$ .

Угол  $\varphi$  учитывает неперпендикулярность направления зондирования по отношению к направлению распространения дымового шлейфа.

Возможность определения параметров  $\mu$  и  $\alpha(S)$  уже обсуждалась выше. Отметим только, что для уменьшения погрешности определения интеграла в выражении (4) вертикальное ска-

нирование дымового шлейфа следует производить с максимально возможным для данного класса аппаратуры пространственно-угловым разрешением.

Угол  $\varphi$  определяется достаточно точно из анализа горизонтальных сечений шлейфа, поскольку все направления зондирования можно привязать к абсолютной угловой системе координат.

Что касается измерения скорости переноса, то здесь существует несколько возможностей. Традиционная из них – это использование для первых нескольких сотен метров пограничного слоя атмосферы показательного закона Дикона [11]. В соответствии с этим законом, измерив скорость ветра на стандартной высоте, например обычным контактным способом, можно аппроксимировать его профиль до требуемых высот. Показатель экспоненты изменяется от нуля до единицы и зависит от степени устойчивости атмосферы и характера окружающей поверхности. Ясно, что более предпочтительными являются прямые измерения скорости ветра, которые можно проводить с помощью того же лидара.

Физической основой лидарных измерений скорости переноса является увлечение ветром аэрозольных частиц шлейфа. Дымовой шлейф, перемещаясь и видоизменяясь во времени и пространстве, создает в атмосфере случайное поле неоднородностей концентрации аэрозольных частиц. По этой причине регистрируемая лидаром совокупность пространственно-временных выборок носит также случайный характер. Для статического описания полученного массива данных, с целью извлечения характеристик скорости ветра, в настоящее время широко используют методы корреляционного и спектрального анализа [12].

Процесс измерения скорости заключается в последовательном (во времени) зондировании шлейфа и накоплении статистической информации об амплитудах сигналов как минимум с двух дальностей. Дистанция между ними образует базу измерений. Если применяется корреляционный анализ, то рассчитывается временная взаимно-корреляционная функция. Взяв отношение базы к временному интервалу сдвига максимума этой функции, можно определить модуль скорости ветра.

При использовании спектрального анализа вычисляются значения кросс-спектров, а затем фазовой функции. Последняя зависит от времени распространения аэрозольных неоднородностей между измерительными точками трассы, т.е. определяется базой и реализуемой скоростью ветра, что и является основой для его оценки. В обоих случаях обрабатывается радиальная составляющая скорости, однако зная взаимное расположение направлений зондирования и распространения шлейфа, можно рассчитать величину скорости переноса.

В заключение данного раздела хотелось бы затронуть еще один вопрос, связанный с выбором местоположения лидарного сечения дымового шлейфа. Выбор этот не должен быть случайным, поскольку зависит как от технических возможностей лидара, так и от некоторых методических особенностей.

Как правило, большинство технологических процессов приводит к тому, что вместе с твердыми аэрозольными частицами в атмосферу выбрасывается достаточно большое количество водяного пара. Как отмечается в [13], это может приводить к возникновению зон локальных пересыщений и, соответственно, к резкому росту водной оболочки аэрозольных частиц.

Как следует из теоретических расчетов [13], поведение относительной влажности на оси дымового шлейфа носит экстремальный характер, принимая минимальное значение вблизи устья трубы и достигая максимума на дистанции  $300 \div 400$  м от нее, в зависимости от метеоусловий и параметров выброса. Протяженность зоны обводнения зольных частиц при этом равна примерно 1000 м.

Из результатов расчетов следует естественный вывод, что зондирование надо производить либо непосредственно над срезом трубы, либо в дальней зоне шлейфа. Однако малые геометрические размеры шлейфа над устьем трубы могут оказаться за пределами углового и пространственного разрешения лидара. Кроме того, высокая концентрация частиц в месте выброса приводит к большому динамическому изменению сигнала. А это, в свою очередь, при ограниченной разрядности АЦП может привести к потере первичной информации.

Возникают определенные трудности и при зондировании в дальней зоне. Зачастую шлейф на таких удалениях уже не представляет единого целого, а разваливается на несколько составляющих, вследствие воздействия атмосферной турбулентности. Помимо этого, при зондировании в районе с несколькими источниками загрязнения велика вероятность того, что на больших дистанциях все дымовые шлейфы сольются в общее аэрозольное поле.



Суммируя изложенное, можно сказать, что существует некоторое оптимальное расстояние от трубы источника загрязнений, на котором необходимо осуществить полный перехват дымового шлейфа сечением сканирования. Анализ теоретических расчетов и экспериментального материала показывает, что это расстояние составляет около 50-100 м.

Таковы некоторые методические и технические аспекты проблемы лазерного зондирования аэрозольных загрязнений.

### Результаты экспериментальных исследований

В данном разделе в качестве примеров приведены результаты дистанционного лазерного контроля воздушных бассейнов гг. Кемерово и Павлодара. В Кемерове наблюдается близкое сосредоточение крупных промышленных предприятий (ГРЭС, коксохимический завод, ПО «АЗОТ» и др.), а в Павлодаре промышленные производства удалены друг от друга на значительное расстояние. Поэтому в дальнейшем будут представлены в основном результаты, полученные в г. Кемерове.

Измерения проводились в период с 24 октября по 2 ноября 1990 года. Топография местности позволила установить локатор на правом, возвышенном берегу реки Томи, а на другой, равнинной стороне, располагались заводские корпуса предприятий.

Схематично карта исследуемого района показана на рис. 3, где квадратиками отмечены положения труб основных источников загрязнений.

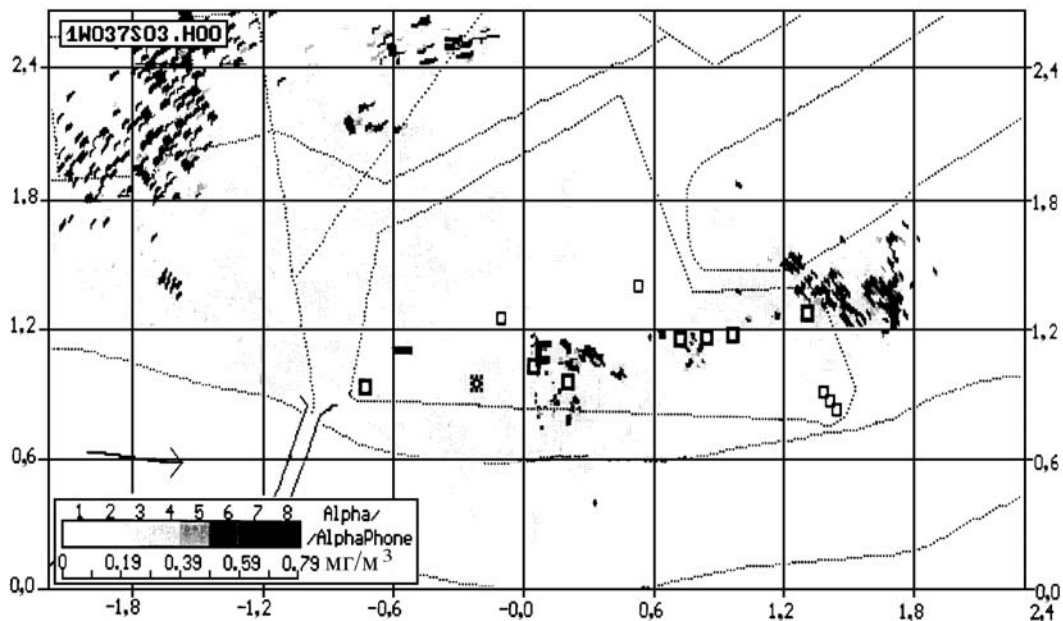


Рис. 3. Картирование распределения аэрозольных загрязнений при азимутальном сканировании под углом места  $7,5^\circ$  в г. Кемерове. Точка 0 – место расположения лидара

В день обычно проводилось 4-6 циклов измерений, каждый из которых включал пять горизонтальных разрезов в азимутальном секторе  $115^\circ$  и четыре вертикальных разреза в секторе  $0 \div 24^\circ$  по углу места. Азимутальное сканирование проводилось под углами  $0; 2,5; 5; 7,5; 10^\circ$  к горизонту с угловым разрешением между направлениями зондирования  $1^\circ$  и пространственным разрешением по трассе 15 м. Максимальная дальность обзора составляла 4,5 км. Таким образом, в каждом горизонтальном разрезе содержалось 116 сигналов, по 300 отсчетов в каждом. Вертикальные разрезы снимались с угловым разрешением  $0,2^\circ$ , что соответствовало 120 сигналам в одном разрезе.

В качестве иллюстрации проведенных измерений на рис. 3, 4 представлены результаты картирования распределения оптико-физических параметров (коэффициент рассеяния – массовая концентрация) аэрозольных загрязняющих полей в воздушном бассейне городского района. В левой верхней части рисунков распечатана структура файла измерений, в котором последова-

тельно указаны порядковые номера проводимой экспедиции, цикла измерений, сечения. Вид сечения (горизонтальный или вертикальный) обозначен в конце файла буквенным названием.

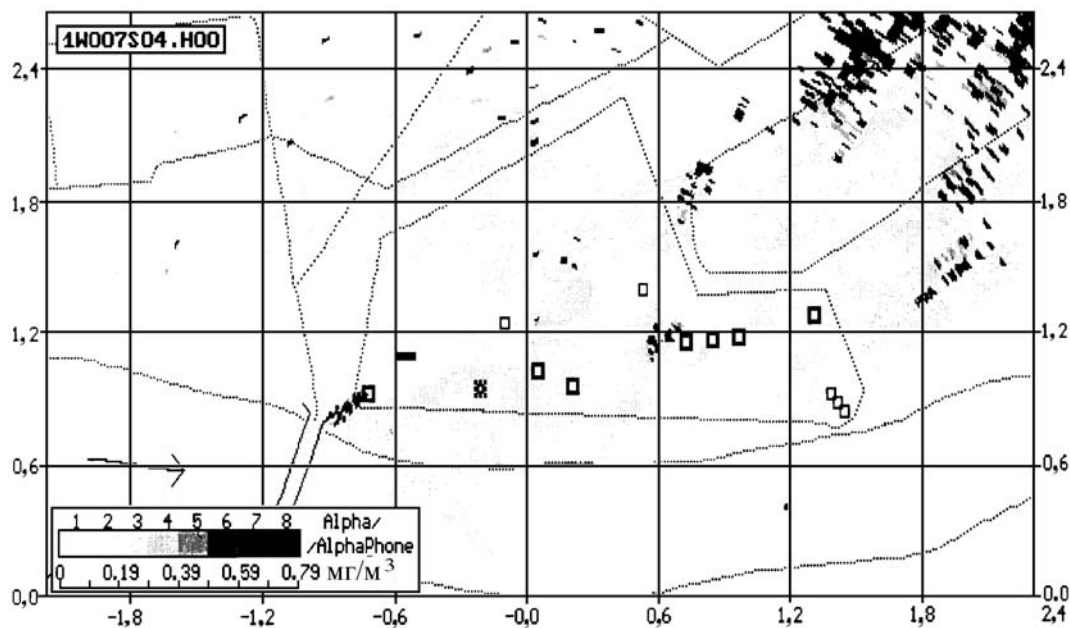


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но под углом места 10°

Подобная структура файла позволяет легко осуществлять архивацию данных, в дальнейшем проводя соответствующую статистическую обработку накопленных массивов.

Распределение концентрации аэрозоля в разрезе представлено в виде интенсивности почернений, шкала отображения которых дана в нижней части рисунков. Данное графическое изображение скорее всего полуколичественно отражает картину распределения концентрации аэрозольных полей. В то же время, поскольку оно сформировано на основе цифрового массива данных, находящегося в памяти компьютера, всегда можно извлечь количественную информацию для любой точки карты. Одна из возможных схем реализации получения такой информации путем использования курсоров по горизонтальной и вертикальной осям была показана ранее на рис. 1.

Описываемые сечения получены последовательно под углами места 7,5 и 10°, что позволяет оценить разницу в пространственных распределениях загрязнении на различных высотах. Одно из таких отличий заключается в регистрации под большим углом дымового шлейфа от трубы ГРЭС, устье которой расположено на высоте 150 м (рис. 4, квадрат с координатами  $x = -0,6; -1,2; y = 0,6; 1,2$ ).

Данный источник по своим топографическим характеристикам (высота трубы, удаление от других источников) весьма существенно отличается от других объектов, и дымовой шлейф от него всегда выделяется на фоне общего поля загрязнений. Именно поэтому выбросы от ГРЭС были для нас предметом специальных исследований, которые заключались в зондировании атмосферы в районе устья трубы с максимальным пространственно-угловым разрешением (сектор  $35 \times 12^\circ$ ).

Время на получение азимутального сечения общего обзора составляло 20 с, контролируемый объем атмосферы  $2,6 \text{ км}^3$ .

Поскольку вид азимутальных сечений, полученных в другие дни, в общих чертах аналогичен представленным, то целесообразно дать все результаты в сжатом виде. Расчеты заключались в вычислении общей массы аэрозольного вещества и его концентрации во всем исследуемом объеме ( $13,2 \text{ км}^3$ , 5 азимутальных сечений) и в объеме, содержащем шлейф от ГРЭС ( $0,4 \text{ км}^3$ ).

Выборочные результаты расчетов для некоторых дней представлены в табл. 2. В колонке «сектор общего обзора» обращают на себя внимание незначительные вариации измеряемых параметров по датам наблюдений. Это, очевидно, связано с тем, что в большом объеме

контролируемого пространства происходит осреднение всех выбросов от локальных источников, а за короткий период наблюдений не произошло существенных изменений ни в метеорологической обстановке, ни в режимах работы многочисленных предприятий.

Т а б л и ц а 2

Результаты измерения аэрозольных загрязнений

№ цикла	Дата	время	Сектор общего обзора		Сектор над трубой ГРЭС	
			Масса, кг	Концентрация, мг/м <sup>3</sup>	Масса, кг	Концентрация, мг/м <sup>3</sup>
	25.10					
4		9-00	1850	0,14	180	0,45
5		11-00	1600	0,12	150	0,38
6		14-00	1480	0,11	136	0,34
7		16-00	1750	0,13	170	0,42
8		18-00	1500	0,11	200	0,50
	28.10					
16		9-00	1470	0,11	350	0,88
17		12-00	1550	0,12	300	0,75
18		14-00	1420	0,11	280	0,70
19		18-00	700	0,13	170	0,42
20		20-00	1650	0,12	250	0,62
	29.10					
21		9-00	1350	0,10	320	0,80
22		12-00	1500	0,11	250	0,62
23		14-00	1600	0,12	280	0,70
24		18-00	1560	0,12	140	0,35
25		20-00	1400	0,10	220	0,55
	1.11					
30		9-00	1400	0,10	220	0,55
31		12-00	1600	0,12	300	0,75
32		14-00	1570	0,12	400	1,00
33		19-00	1380	0,10	130	0,33
34		21-00	1400	0,10	200	0,50
35		23-00	1280	0,11	126	0,31

При зондировании атмосферы с меньшим объемом осреднения следует ожидать более значимых колебаний параметров, что и отмечается по данным другой колонки таблицы. Отметим, что изменения наблюдаются как в течение одного дня, так и ото дня ко дню.

В свете изложенного представляет интерес проследить временную динамику изменения интенсивности выброса из той же трубы ГРЭС, Для этой цели, путем вертикального сканирования с разрешением 0,2° получили поперечные разрезы дымового шлейфа на удалениях 50, 100 и 150 м от трубы. Вид этих разрезов показан на рис. 5, причем в цикле содержится 10 сечений, а на рисунке представлены только первые пять. Временной интервал между сечениями в одном цикле составлял 2 мин.

Как видно из рисунка, по мере удаления от источника наблюдается общеизвестный факт увеличения поперечных размеров шлейфа, при этом на дальних участках он сохраняет в общем-то целостную структуру (рис. 5, средний и нижний ряды). Однако на ближнем участке отмечен развал шлейфа на две части, которые обычно одинаковы по размеру. По нашим представлениям, появление нижней части шлейфа обусловлено выпадением крупнодисперсной фракции зольных частиц, которое начинается в непосредственной близости от устья трубы. Судя по отсутствию подобной картины в последующих циклах (рис. 5, средний и нижний ряды), протяженность зоны выпадения ограничивается 100 м.

Это является еще одним подтверждением необходимости оценки интенсивности выброса по сечениям шлейфа на более близких дистанциях от источника загрязнений.

Для реализации этой оценки предварительно были проведены измерения скорости переноса с использованием лидара, которые показали, что скорость переноса составила около 10 м/с.

Другим возможным вариантом определения скорости переноса шлейфа в направлении, перпендикулярном линии визирования, является применение телевизионной аппаратуры. Для реализации этой идеи была разработана аппаратура ввода телевизионных сигналов в ПЭВМ, а затем проведен корреляционный анализ изображений дымовых шлейфов, снятых

через некоторый интервал времени. Пространственным масштабом, в данном случае, являются одновременно снимаемые размеры устья трубы источника.

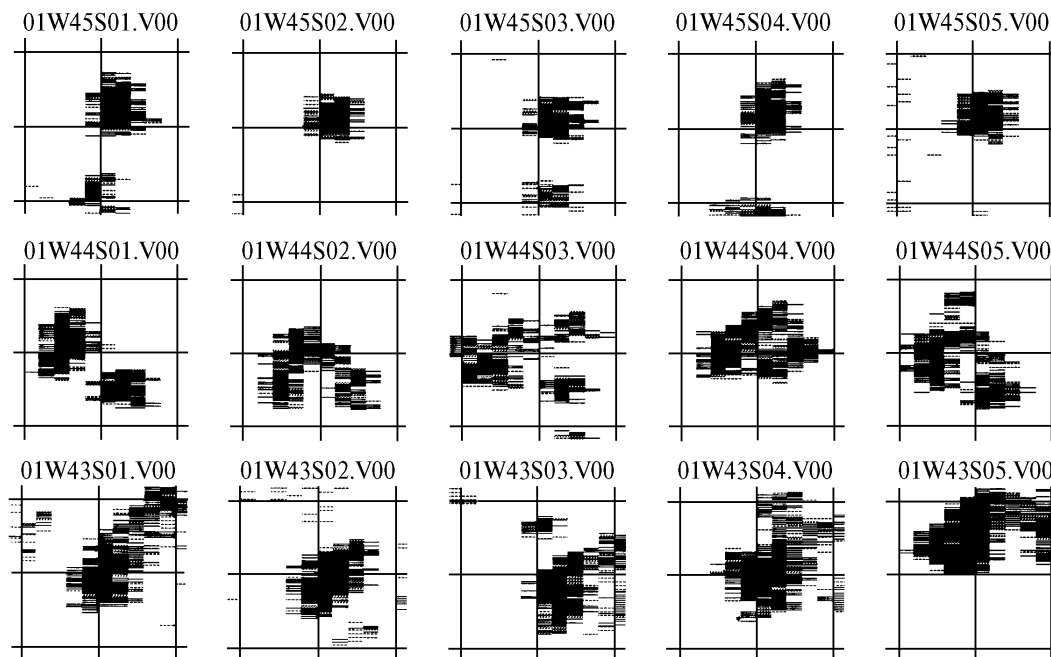


Рис. 5. Вертикальные сечения дымового шлейфа ГРЭС в зависимости от времени (интервал 2 мин.) и удаления от устья трубы на 50 (верхний ряд), 100 и 150 м. Размер квадрата масштабной сетки 75 × 75 м

Результаты измерений искомого компонента скорости переноса составили такую же величину, как в лидарных экспериментах. Вертикальный компонент был около 2 м/с.

С использованием полученного значения скорости переноса и массовой концентрации в сечении шлейфа (50 м) были проведены оценки интенсивности выбросов из трубы ГРЭС на протяжении нескольких часов. Временная зависимость изменения этого параметра представлена на рис. 6. Налицо выраженная динамика изменения интенсивности выброса, выходящая за пределы возможных ошибок измерений. Ясно, что для надежной оценки этих ошибок необходима серия контрольных испытаний, например, с помощью непосредственных измерений в газопроводах, подходящих к трубе от котлов тепловой станции.

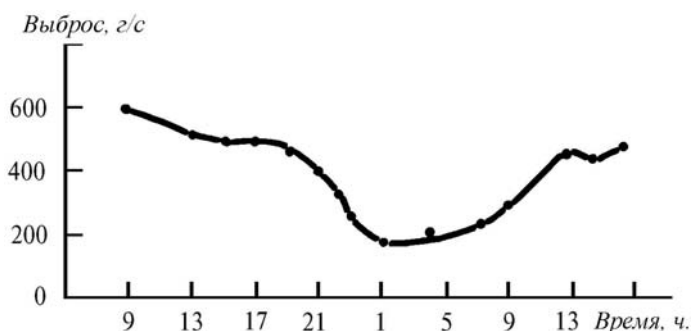


Рис. 6. Временная зависимость интенсивности выброса загрязнений из трубы ГРЭС, полученная 1+2 ноября 1990 г.

В данных исследованиях такого сопоставления, однако, сделать не удалось вследствие отсутствия необходимого количества оборудования и персонала, способного одновременно контролировать более десятка газопроводов.

В дальнейшем, как один из вариантов совместной калибровки, можно рассмотреть возможность одновременной работы по устью трубы еще одного дистанционного средства – КР-лидара, основанного на регистрации спектров комбинационного рассеяния излучения [14].

Аналогичное применение лидар нашел при контроле воздушного бассейна г. Павлодара, расположенного на равнинной местности со значительным удалением крупных производств друг от друга. Определенную долю загрязняющих веществ в атмосферу города вносят заводы г. Ермака, находящегося в 15 км от Павлодара. Все это предопределило следующую постановку задачи. Лидар должен размещаться на крыше самого высокого здания города и иметь потенциал, обеспечивающий контроль атмосферы до дальностей 7–10 км.

Для увеличения потенциала локатора был применен лазер ЛТИ-407, обладающий энергией в импульсе порядка 80 мДж. Все остальные параметры лидара соответствовали характеристикам аппаратуры, приведенной в табл. 1.

Приемопередатчик лидара был смонтирован под защитным вращающимся колпаком на крыше 12-этажного здания, а аппаратура управления и регистрации – в комнате верхнего этажа.

Приводимый ниже азимутальный разрез иллюстрирует еще одну возможную форму предоставления данных (рис. 7). Карта распределения аэрозольных загрязнений представлена в прямоугольной системе координат с размером квадрата масштабной сетки 1 × 1 км. Аэрозольное поле регистрировалось с угловым разрешением 1° и пространственным разрешением 60 м. Информация о величине массовой концентрации представлена непосредственно в каждом квадрате карты, являясь осредненным значением по этой площади.

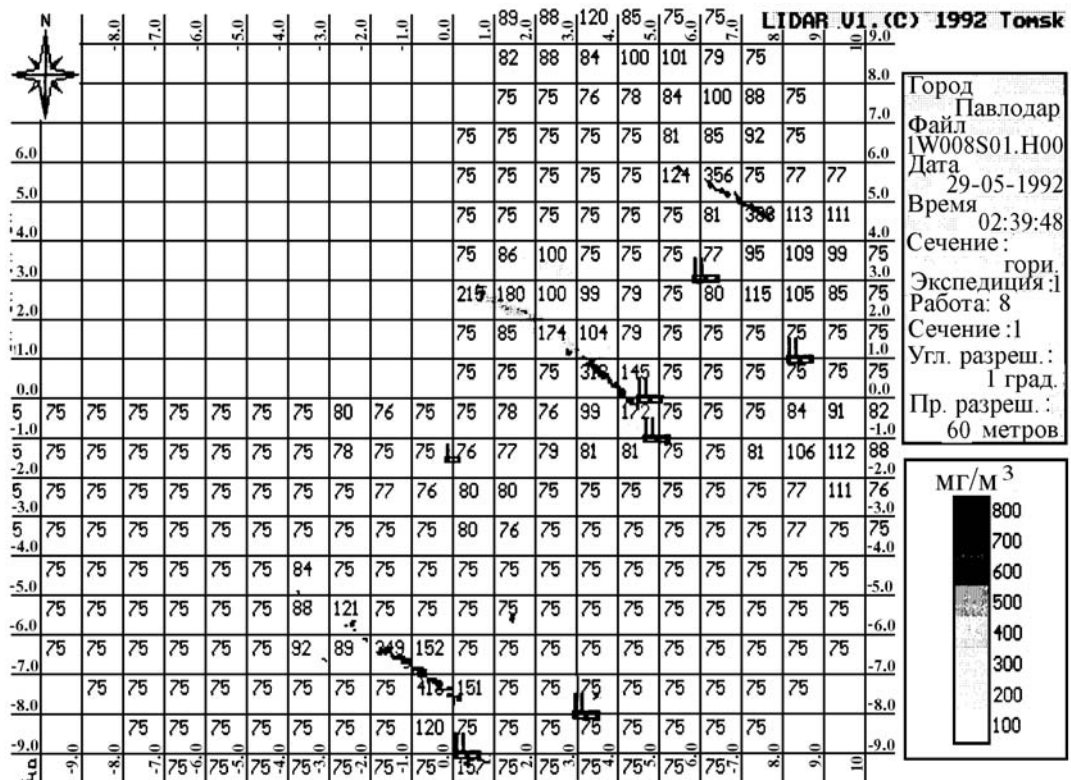


Рис. 7. Картирование распределения аэрозольных загрязнений при азимутальном сканировании под углом места 2° в г. Павлодаре

Незаполненный фрагмент рисунка обозначает зону необследованного воздушного пространства той части города, где отсутствуют источники выбросов. Место расположения лидара соответствует точке пересечения южной и восточной границ этой зоны.

Выделенная центральная часть рисунка иллюстрирует возможности лидара по контролю распространения дымовых шлейфов на большие расстояния. В данном случае осуществлялся дистанционный мониторинг мощных источников загрязнений алюминиевого и тракторного заводов.

При необходимости любой фрагмент карты с размерами, как меньшими квадрата масштабной сетки, так и некоторой их совокупности, можно вывести в увеличенном масштабе.

Это наглядно демонстрирует рис. 8, показывающий более детально выделенный фрагмент центральной части рис. 7.

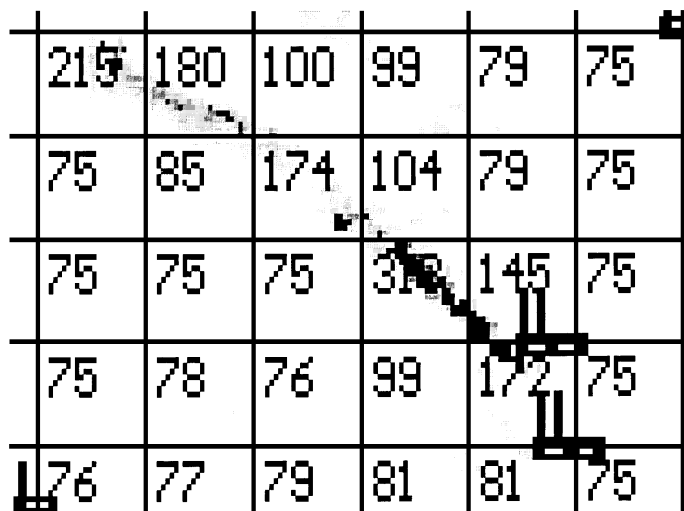


Рис. 8. Увеличенный фрагмент изображения центральной части рис. 7

Понятно, что для каждого города могут выдвигаться свои особенности работы лидара, в том числе в форме представления информации. Но существующий уровень техники и программного обеспечения позволяет легко адаптировать режимы работы для любых конкретных условий.

### Заключение

Изложенные в статье материалы дают некоторое представление о возможностях лидаров и тех проблемах, которые возникают при их использовании для экологического контроля воздушного бассейна города.

Дальнейшие перспективы внедрения лидаров следует связывать с применением специализированных оптимальных помехоустойчивых алгоритмов обработки лидарных сигналов, например, основанных на статистическом подходе [15], и с совершенствованием техники зондирования. Именно поэтому в настоящее время в Институте оптики атмосферы разрабатывается специализированный малогабаритный сканирующий лидар, который можно устанавливать на крышах зданий и на подвижных носителях.

Помимо этого одним из наиболее важных этапов внедрения является экологическая и метрологическая аттестация лидаров.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить сотрудников Института Г.С. Байрашина, А.П. Ростова, А.М. Сутормина, внесших большой вклад в создание лидара с помощью которого проводились исследования.

1. Collis R. T. H., Uthe E. E. //Opto-electron. 1972. V. 4. № 2. P. 87.
2. Лазерный контроль атмосферы //Под ред. Э. Д. Хинкли, М.: Мир, 1979, 416 с.
3. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей //Под ред. М.В. Кабанова. Новосибирск: Наука, 1986. 186 с.
4. Сигналы и помехи в лазерной локации //Под ред. В.Е. Зуева, М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
5. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М. //Дистанционное зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1978. С. 3–40.
6. Кавкянов С.И. //IV Всесоюз. симпозиум по лазерному зондированию атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1976 С. 95–98.
7. Зуев В.Е., Заде Г.О., Кавкянов С.И., Кауль Б.В. //Дистанционное зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1978. С. 60–68.
8. Klett J. D. //Appl. Opt. 1981. V. 20. P. 211.
9. Уваров Д.Б., Жуков Г.П. //Тр. Института экспериментальной метеорологии. 1976. Вып. 15 (60). С. 100–117.
10. Антонович А.А., Заде Г.О., Поданев А.В. //Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 9. С. 954–958.
11. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. М.: Мир, 1980. 539 с.

12. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра. // Под ред. И.В. Самохвалова. Новосибирск: Наука, 1985. 222 с.
13. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. //Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 5. С. 517–524.
14. Аршинов Ю.Ф., Бобровников С.М., Шуйский В.К. и др. //Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 7. С. 726–733.
15. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 240 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
9 декабря 1992 г.

**Yu. S. Balin, I. A. Razenkov. Laser Monitoring of Aerosol Pollution of Air Basin of Industrial Centers.**

A scanning single-frequency aerosol lidar is described. The lidar system of control, recording and data processing has been developed on the basis of a computer. The problem of lidar signal processing in the presence of apparatus noise is considered. The examples of the use of the lidar for control of space-time distribution of aerosol polluting fields as well as the intensity emission determination from the chimneys of local pollution sources are presented.