

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ  
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501.816:535.36

С.С. Хмелевцов,<sup>1</sup> В.А. Коршунов,<sup>1</sup> В.М. Никитин,<sup>2</sup> В.В. Кобелев<sup>2</sup>

**Многоволновое и поляризационное лидарное зондирование  
аэрозольных промышленных выбросов**

<sup>1</sup> НПО «Тайфун» Росгидромета, г. Обнинск Калужской области

<sup>2</sup> Белгородский государственный университет

Поступила в редакцию 20.12.2004 г.

Проведено трехволновое (355, 532 и 1064 нм) и поляризационное (532 нм) лидарное зондирование аэрозольной струи, создаваемой трубами цементного производства. В зоне турбулентного рассеяния примеси вне видимой части струи степень деполяризации сигнала от частиц примеси составляет около 40%. Характерная величина эквивалентного радиуса частиц, восстановленного по данным измерений коэффициентов ослабления, равна 0,9 мкм. Приводится зависимость массовой концентрации примеси от расстояния до источника. Результаты измерений массовой концентрации лидарным методом находятся в удовлетворительном согласии с известными литературными данными, полученными путем численного моделирования и прямых измерений.

**Введение**

Загрязнение воздушного бассейна крупных промышленных центров аэрозольными и газовыми выбросами оказывает вредное влияние на здоровье людей и окружающую среду. Комплекс мероприятий по снижению уровня этих загрязнений должен включать и наличие адекватных средств контроля за величиной выбросов. Среди них не последнюю роль могут сыграть дистанционные методы контроля, в частности лидарные методы. В данной статье рассматривается возможность применения многоволнового и поляризационного зондирования для контроля характеристик аэрозольных выбросов, образующихся при производстве цемента. Работы проводились в заводском районе г. Белгород, где расположено крупное цементное производство.

Как известно, калибровка лидара является существенно необходимой частью лидарных измерений. При проведении зондирования атмосферного аэрозоля калибровка лидара чаще всего осуществляется путем привязки сигналов к коэффициентам обратного рассеяния в точках трассы, где последние считаются известными. Точки привязки обычно выбираются в высоких слоях атмосферы, где коэффициент обратного рассеяния близок к рэлеевскому. При зондировании городского аэрозоля, в частности шлейфов аэрозольных выбросов, наклон трассы зондирования по отношению к горизонту невелик и выход на большие высоты нереален из-за ослабления излучения на трассе. Это создает определенные трудности при калибровке лидарного сигнала.

Альтернативный подход к зондированию аэрозольных выбросов, распространяющихся в виде аэрозольной струи, основан на определении коэффициентов ослабления [1,2]. В [1] оптическая тол-

щина струи определяется путем сравнения сигналов до струи и за струей. При этом используется предположение об однородности фоновой аэрозольной атмосферы вдоль трассы зондирования и пренебрегается ослаблением сигналов в фоновой атмосфере.

В [2] используется более слабое предположение о том, что профиль фонового аэрозольного коэффициента обратного рассеяния вдоль трассы зондирования не зависит от выбора направления зондирования в некоторой ограниченной области углов зондирования, прилегающих к устью трубы. Оптическая толщина струи определяется путем сравнения сигналов от фоновой аэрозольной атмосферы с сигналами от аэрозольной струи. Метод измерения [2] принят Американским агентством по защите окружающей среды (EPA) в качестве официального альтернативного метода определения оптической толщины аэрозольного шлейфа от стационарного дымового источника.

По лидарным измерениям на одной длине волны можно контролировать изменение величины выбросов во времени и определять поле рассеяния выбросов в пространстве [3, 4]. Однако в соответствии с действующими сейчас правилами и стандартами для количественной оценки выбросов принято использовать величину массовой (объемной) концентрации аэрозоля. Коэффициенты связи между оптическими и объемными характеристиками аэрозоля зависят от микрофизических характеристик аэрозоля и могут меняться в значительных пределах [4].

Для учета вариаций микрофизических характеристик аэрозоля целесообразно использовать многоволновое зондирование, позволяющее определять коэффициенты ослабления на нескольких длинах волн. Отсюда путем решения обратной задачи могут быть восстановлены интегральные параметры

аэрозоля в струе, и в частности массовая концентрация аэрозоля. Поскольку в пылевых выбросах можно ожидать наличие несферических частиц, дающих заметную деполаризацию сигналов обратного рассеяния [3–5], то многоволновое зондирование имеет смысл сопровождать поляризационным зондированием с целью идентификации типа частиц.

Отметим, что использование коэффициентов ослабления вместо коэффициентов обратного рассеяния имеет существенные преимущества при решении обратных задач в случае несферического аэрозоля, так как коэффициенты ослабления менее чувствительны к форме частиц по сравнению с коэффициентами обратного рассеяния [6]. Возможность замены несферических частиц эквивалентными по площади поверхности сферами при расчетах коэффициентов ослабления зависит от размеров и типа частиц. Так, по данным [6] для хаотически ориентированных сфероидов и цилиндров с параметром  $\rho_e = 2\pi r_e/\lambda \geq 5$  (где  $r_e$  – радиус эквивалентной по площади сферы,  $\lambda$  – длина волны) и умеренным параметром формы  $\chi$  (от  $1/2$  до 2) возникающая при замене разница укладывается в несколько процентов. Поэтому в диапазоне размеров, удовлетворяющих указанному условию, при решении обратной задачи можно пользоваться расчетами по формулам Ми для сферических частиц. При этом метод решения должен быть согласован с погрешностью расчетов и экспериментальных данных. Так, при погрешностях порядка нескольких процентов и числе измеряемых оптических характеристик не более четырех можно рассчитывать только на восстановление интегральных параметров распределений, что может быть достаточным для решения многих прикладных задач.

## Описание эксперимента

В экспериментах использовался многоволновый мобильный лидар МВЛ-60, смонтированный

в автомобильном прицепе. Лидар может работать в двух режимах измерений – многоволновом и поляризационном. Основные технические характеристики лидара приведены ниже.

В многоволновом режиме измерений приемный блок обеспечивает работу четырех параллельных приемных каналов. В настоящее время проводятся одновременные измерения на длинах волн 1064, 532 и 355 нм, а в дальнейшем планируется использовать 4-й канал для приема сигналов комбинационного рассеяния на атмосферном азоте. В режиме поляризационного зондирования осуществляется прием двух поляризационных компонент сигнала на длине волны 532 нм с поляризациями, параллельной и перпендикулярной поляризации излучения, направляемого в атмосферу. Передающий блок лидара включает лазер LS-2137, излучение которого с помощью спектроделителей разводится по длинам волн в три отдельных канала. В каждом из каналов установлен коллиматор для уменьшения расходимости излучения с коэффициентом коллимации  $3,6^x$ . В канале 532 нм установлена также призма Глана, используемая при калибровке поляризационных приемных каналов. Приемный телескоп с передающим устройством установлен на альфа-азимутальном поворотном устройстве, обеспечивающем сканирование по углу места от  $-10$  до  $90^\circ$  и по азимуту от 0 до  $360^\circ$ .

При проведении зондирования лидар располагался на возвышенности на расстоянии около 2 км к югу от группы труб цементного предприятия, расположенных компактно в пределах площадки  $100 \times 100$  м. Высота наиболее высокой трубы составляла 100 м. С западной стороны от труб на расстоянии около 900 м располагался еще один источник пылевого аэрозоля, создававший при западном направлении ветра дополнительное распределенное облако пылевого аэрозоля. Средняя температура пылегазовых компонентов, выбрасываемых

### Основные технические характеристики лидара

Излучатель	
Лазер . . . . .	LS-2137
Длины волн, нм . . . . .	1064, 532, 355
Энергия импульса, мДж, на длине волны, нм	
1064 . . . . .	550
532 . . . . .	300
355 . . . . .	120
Частота повторения импульсов, Гц . . . . .	от 1 до 10
Длительность импульса лазерного излучения по уровню 0,5, нс . . . . .	не более 15–17
Угловая расходимость лазерного луча по уровню 0,5, угл. мин . . . . .	не более 2
Приемник	
Диаметр главного зеркала телескопа, мм . . . . .	600
Поле зрения телескопа, угл. мин . . . . .	2 – 10
Число приемных каналов . . . . .	2 – 4
Полоса пропускания интерференционных фильтров по уровню 0,5, нм . . . . .	2 – 5
Режим обработки сигналов . . . . .	аналоговый
Фотоприемники . . . . .	ФЭУ-83 (1 шт.), ФЭУ-100 (3 шт.)
АЦП . . . . .	два 25 МГц / 12 бит, двухканальные

из труб в атмосферу, в соответствии с технологией производства составляла 100 °С, а скорость их истечения из устья трубы – порядка 5 м/с. В результате перемешивания с холодным воздухом происходит конденсация водяного пара и образуется видимый аэрозольный шлейф, расширяющийся по мере удаления от источника. При зондировании видимой части струи аэрозоля основной вклад в обратное рассеяние дают водяные капли, образующиеся в результате конденсации.

Для оценки выбросов пылевого аэрозоля зондирование проводилось в зоне турбулентного рассеяния примеси вне визуально наблюдаемой струи. Схема эксперимента представлена на рис. 1, а.

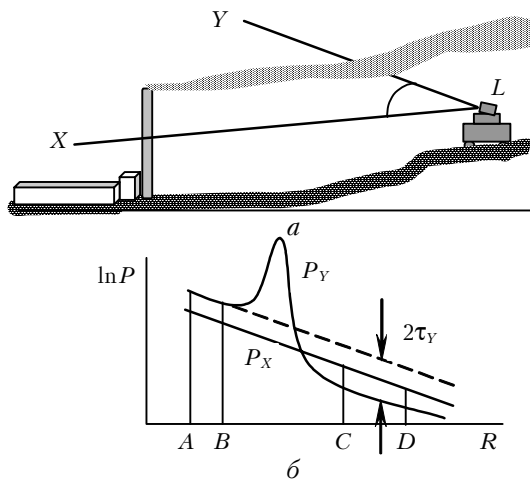


Рис. 1. К методике определения оптической толщины аэрозольной струи: а – схема эксперимента: зондирование под струей вдоль линии  $LY$  дает сигнал  $P_Y$ , зондирование «чистой атмосферы» вдоль линии  $LX$  дает сигнал  $P_X$ ; б – определение оптической толщины струи из сопоставления сигналов  $P_Y$  и  $P_X$

Лидар расположен в точке  $L$ , направления зондирования  $LX$  и  $LY$  отличаются азимутом при постоянном угле места. При этом трасса  $LX$  проходит в области, свободной от аэрозольных загрязнений, и дает фоновый сигнал обратного рассеяния  $P_X(R)$  от «чистой атмосферы» в зависимости от расстояния  $R$  вдоль трассы зондирования. Трасса зондирования  $LY$  проходит в зоне рассеяния примеси и дает сигнал  $P_Y(R)$ .

## Методика многоволновых измерений

На рис. 1, б иллюстрируется методика определения оптической толщины аэрозольного шлейфа (струи) и его среднего коэффициента ослабления. Отрезки трассы  $AB$  и  $CD$  представляют собой отрезки сравнения сигналов  $P_X$  и  $P_Y$  до струи и за струей. Считается, что сигналы скорректированы на квадрат расстояния. Тогда соотношения между сигналами  $P_X$  и  $P_Y$  для отрезков  $AB$  и  $CD$  можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} (AB) \ln P_Y(R) + K + \delta(\ln P_Y(R)) &= \ln P_X(R), \\ (CD) \ln P_Y(R) + K + \delta(\ln P_Y(R)) &= -2\tau_Y + \ln P_X(R), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\tau_Y$  – оптическая толщина струи;  $K$  – независимая от  $R$  константа, ответственная за изменения, произошедшие между зондированиями по линиям  $LX$  и  $LY$ , включая, например, изменение энергии посылаемых импульсов излучателя лидара, крупномасштабные изменения состояния аэрозольной среды, изменения прозрачности атмосферы на участке трассы от лидара до точки  $A$  и т.д.,  $\delta(\ln P_Y(R))$  – флуктуации сигнала, вызываемые погрешностью регистрации сигналов и мелкомасштабными (по сравнению с расстоянием между точками  $A$  и  $D$ , а также расстоянием между трассами  $LX$  и  $LY$ ) флуктуациями оптических характеристик фоновой аэрозольной среды.

В пренебрежении флуктуациями из (1) следует соотношение для определения  $\tau_Y$ :

$$\begin{aligned} \tau_Y &= 0,5[(\ln P_Y(R) - \ln P_X(R))_{AB} - \\ &- (\ln P_Y(R) - \ln P_X(R))_{CD}], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\langle \rangle$  обозначает усреднение по отрезкам  $AB$  или  $CD$ .

Флуктуации сигналов  $\delta(\ln P_Y(R))$  являются источниками погрешности измерений  $\delta\tau_Y$ . Расчет флуктуаций в зависимости от атмосферных условий представляет достаточно сложную задачу. Оценку же погрешности  $\delta\tau_Y$  можно провести на основе модельного эксперимента, включающего ряд последовательных зондирований по трассе  $LX$ . При обработке полученных данных одно из зондирований считается фоновым, а для остальных по формуле (1) определяются оптические толщины, которые и дают непосредственную оценку погрешности  $\delta\tau_Y$ . В частности, по результатам такого эксперимента в антициклональных условиях  $\delta\tau_Y = 0,02$ .

Вместе с  $\tau_Y(\lambda)$  на длинах волн зондирования  $\lambda$  находились средние коэффициенты ослабления в аэрозольном шлейфе  $\sigma(\lambda) = \tau_Y(\lambda)/\Delta R$ , где  $\Delta R$  – характерный размер аэрозольного шлейфа на уровне 0,5 от максимума. Набор  $\sigma(\lambda)$  на трех длинах волн 355, 532 и 1064 нм использовался далее для определения интегральных параметров аэрозоля.

Рассмотрим возможности оценки характерных размеров частиц по измерениям коэффициентов ослабления для данного набора длин волн. Из коэффициентов ослабления можно получить два параметра, зависящих только от размеров, но не от концентрации частиц, – это отношения

$$R_{12} = \sigma(355)/\sigma(532) \text{ и } R_{13} = \sigma(355)/\sigma(1064).$$

На рис. 2 на плоскости  $(R_{12}, R_{13})$  представлена заданная в параметрическом виде кривая  $\{R_{12}(r_0), R_{13}(r_0)\}$ , где  $r_0$  – медианный радиус логарифмически нормального распределения

$$f(r) = r^{-1} \exp[-(\ln r/r_0)^2 / (2\rho^2)]$$

( $r$  – радиус частиц) с параметром  $\rho = 0,2$ , который соответствует достаточно узкому распределению по размерам.

Расчеты представлены для показателя преломления  $n = 1,55 - 0,005i$ . Для других показателей в области изменения  $n$  от 1,35 до 1,60 общий вид

зависимостей сохраняется. Параметр  $r_0$  меняется в интервале 0,05–3 мкм, для ряда точек значения  $r_0$  показаны на поле рис. 2.

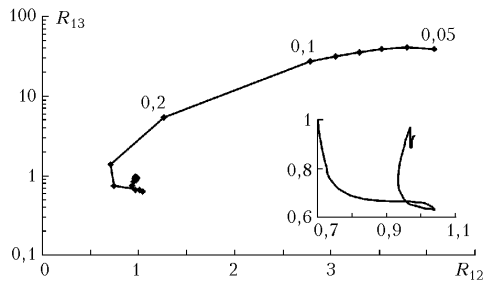


Рис. 2. Параметрическая зависимость отношений коэффициентов ослабления  $\{R_{12}(r_0), R_{13}(r_0)\}$  от  $r_0$  — медианного радиуса логарифмически нормального распределения частиц по размерам. Радиус  $r_0$  меняется в пределах 0,05(0,01)0,1 и 0,1(0,1)1,5 мкм. В правом нижнем углу графика показан фрагмент общей зависимости в более крупном масштабе

Из рис. 2 следует, что измерения  $R_{13}$  и  $R_{12}$  в отдельности не могут обеспечить однозначного определения размеров частиц в области 0,05–3,0 мкм. При одновременном измерении  $R_{13}$ ,  $R_{12}$  однозначное определение размеров возможно в том случае, когда кривая  $\{R_{12}(r_0), R_{13}(r_0)\}$  не является самопересекающейся. В данном случае, как видно из рис. 2, кривая не имеет точек самопересечения от 0,05 до 3 мкм за исключением небольшой петли в районе 0,5–0,7 мкм. Поскольку площадь петли невелика, то здесь можно говорить не о неоднозначности, а скорее о возрастании погрешностей определения размеров частиц для области 0,5–0,7 мкм.

Анализ данных рис. 2 показывает, что потеря чувствительности измерений к размерам частиц со стороны крупных частиц происходит в области 1,5–2 мкм. Таким образом, имеется принципиальная возможность оценки размеров частиц, по крайней мере в классе одномодальных распределений в интервале характерных размеров от 0,05 до 1,5–2 мкм.

Для получения предварительной информации о характерном размере частиц был проведен отбор проб частиц, задержанных в последнем из аэрозольных фильтров электростатического типа, установленных в трубе предприятия. Собранные частицы распылялись на подложку и анализировались под микроскопом. Оказалось, что подавляющее большинство частиц имеют размеры в диапазоне от 2 до 4 мкм и вытянутую форму, причем степень вытянутости (отношение максимального и минимального размеров) не превышает 3. Отсюда можно сделать вывод, что и в вылетающем из трубы аэрозоле частицы имеют размеры, по крайней мере, не превышающие 4 мкм (или радиусы не больше 2 мкм при замене их эквивалентными сферами). Таким образом, по предварительным данным размеры частиц не должны были выходить за пределы области чувствительности лидарных измерений.

По результатам измерений оптических толщин на трех длинах волн проводилось восстановление функции распределения частиц по размерам с последующим расчетом интегральных параметров. При восстановлении спектра использовался комбинированный метод, включающий: 1) параметризацию спектра с последующим выбором оптимальных параметров; 2) метод регуляризации с выбором параметра регуляризации по невязке.

На этапе параметризации использовалось логарифмически нормальное распределение. При неудовлетворительном (с точки зрения невязки) результате оптимизации параметров решение «подправлялось» методом регуляризации. По найденному распределению вычислялась объемная концентрация  $V$  (мкм<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>) и характерный радиус  $r_{32}$  (мкм) (отношение третьего момента распределения ко второму). Отметим, что для несферических частиц эквивалентные по площади поверхности и по объему радиусы не совпадают, однако для умеренно вытянутых (сплюснутых) сфероидов и цилиндров ( $1/2 \leq \chi \leq 2$ ) эта разница не превышает 5% [6], что позволяет рассчитывать  $V$ , не учитывая форму частиц.

Данный алгоритм восстановления интегральных параметров апробировался в численном эксперименте. В качестве исходных распределений по размерам брались различные функции, включая логарифмически нормальное распределение, а также одномодальные выпуклые функции более общего вида. При разыгрывании исходных распределений характерный радиус  $r_{32}$  менялся от 0,5 до 2 мкм. Полученные погрешности восстановления объемной концентрации составляли 15–20% при отсутствии погрешностей в экспериментальных данных и увеличивались до 30–40% при введении 20% погрешностей в данные измерений коэффициентов ослабления.

## Результаты измерений и их обсуждение

### а) Поляризационные измерения

На рис. 3 приведены примеры обработки данных поляризационного зондирования для трех характерных случаев зондирования, включая зондирование чистой атмосферы (рис. 3,а), визуально наблюдаемой аэрозольной струи, выходящей из трубы (рис. 3,б) и аэрозольного шлейфа под струей (рис. 3,в).

На рис. 3 представлены сигнал обратного рассеяния  $P_{\parallel}$  с поляризацией, параллельной исходной, в относительных единицах и степень деполаризации сигнала обратного рассеяния  $d = P_{\perp}/P_{\parallel}$ . В чистой атмосфере (рис. 3,а) степень деполаризации сигнала приблизительно постоянно вдоль трассы зондирования и колеблется около 0,07. В струе (рис. 3,б) и под струей (рис. 3,в) наблюдается всплеск  $d$ . Из рис. 3,б видно, что в передней части видимой струи вплоть до максимума сигнала величина  $d_2$  постоянна, а затем начинает быстро возрастать.

Такое поведение  $d$  характерно для жидкокапельных сред, а возрастание  $d$  связано с влиянием эффектов многократного рассеяния в глубине струи.

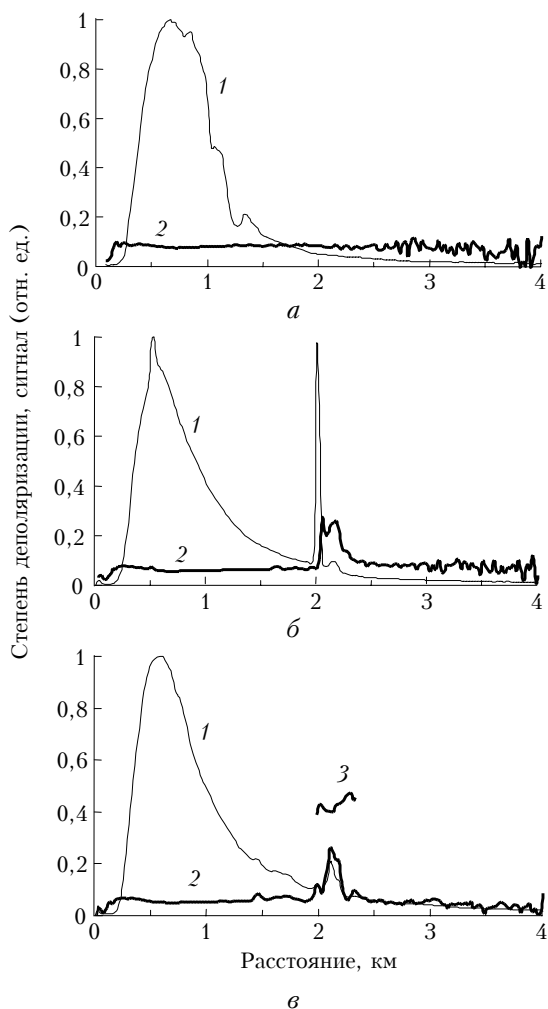


Рис. 3. Сигналы обратного рассеяния с поляризацией, параллельной исходной,  $P_{\parallel}$ , отн. ед. (1), и профили степени деполаризации  $d$  (2) для случая зондирования «чистой» атмосферы (а), визуально наблюдаемой части струи (б) и зоны турбулентного рассеяния примеси вне видимой части струи (в). Кривая 3 (в) – расчет степени деполаризации сигнала обратного рассеяния только от примеси  $d_2$

На рис. 3,в представлен результат расчета степени деполаризации отдельно для чистой атмосферы и для аэрозоля примеси. Для этого сигнал чистой атмосферы экстраполировался в область примеси и вычислялось отношение  $G = P_{\parallel 1}/P_{\parallel 2}$ , где индекс 1 относится к экстраполированному сигналу, а индекс 2 – к аэрозолю примеси. Исходя из того, что измеряемая величина  $d = (P_{\perp 1} + P_{\perp 2})/(P_{\parallel 1} + P_{\parallel 2})$ , нетрудно получить, что  $d_2 = d + G(d - d_1)$ , где  $d_1$  – степень деполаризации чистой атмосферы, экстраполированная в область примеси,  $d_2$  – степень деполаризации примеси. Вычисленная таким образом  $d_2(R)$  также представлена на рис. 3,в. В области аэрозольного шлейфа под струей (рис. 3,в) степень деполаризации  $d_2(R)$  составляет  $\approx 0,4$ , слабо меняясь по сечению шлейфа. Эти результаты яв-

ляются типичными для всех измерений степени деполаризации аэрозоля вне видимой струи: величина  $d_2$  менялась в узких пределах от 0,39 до 0,42. Заметим, что близкие значения степени деполаризации 0,4–0,45 были получены вне видимой части струи для дымов ГРЭС, прошедших очистные фильтры [3]. Полученные высокие значения коэффициента деполаризации показывают, что степень увлажнения частиц цементной пыли вне струи незначительна. Отметим, что в большинстве случаев измерений относительная влажность воздуха во время зондирования не превышала 55%.

Представляет интерес сопоставить результаты натуральных лидарных измерений с данными [5], где проводились измерения степени деполаризации  $d$  обратного рассеяния для пылевого аэрозоля и цементной пыли, распыленной внутри помещения. Для цементной пыли  $d = 0,56$  сразу после распыления, а по истечении 5 мин после оседания наиболее крупных частиц значение  $d$  стабилизировалось на уровне 0,40–0,42, что находится в хорошем соответствии с приведенными выше данными. Результаты измерений  $d$  не противоречат и расчетным данным [6]. Действительно, по результатам трехволновых измерений (см. ниже) для зондируемой цементной пыли характерно значение параметра  $\rho_e = 10$ . По данным же [6] в области  $\rho_e = 5 \div 10$  достигаются максимальные величины  $d$  и при некоторых значениях параметра формы (например, 2 или 1/2 для цилиндров, 1,4 для сфероидов) расчетные значения  $d$  при  $\rho_e = 10$  приближаются к измеренным  $d = 0,4$ .

### б) Трехволновое зондирование

Первичная обработка данных зондирования показала, что в зависимости от ориентации трассы зондирования относительно оси струи имели место значительные флуктуации параметров аэрозольного шлейфа. Оптическая толщина менялась в пределах 0,05–0,6, геометрический размер по уровню 0,5 от максимума – от 50 до 700 м и средний коэффициент ослабления на 532 нм – от 0,1 до 4 км<sup>-1</sup>. Отношения коэффициентов ослабления  $\sigma(355)/\sigma(532)$  менялись в диапазоне от 0,7 до 1,2,  $\sigma(355)/\sigma(1064)$  от 0,5 до 1,1. По результатам восстановления интегральных параметров получено, что характерный радиус  $r_{32} = (0,9 \pm 0,3)$  мкм, а коэффициенты связи между коэффициентами ослабления и массовой концентрацией составили  $(1,3 \pm 0,4)$ ,  $(1,3 \pm 0,6)$  и  $(1,2 \pm 0,4)$  мг·км/м<sup>3</sup> для длин волн 355, 532 и 1064 нм. Отметим, что по данным [4] коэффициенты связи в зависимости от типа аэрозоля меняются в пределах 0,1–1,5 мг·км/м<sup>3</sup>. В данном эксперименте значения коэффициентов связи близки к верхнему пределу указанного диапазона. Это объясняется тем, что частицы цементной пыли являются относительно более крупными по сравнению с частицами тех промышленных загрязнений, которые образуются в результате конденсационных процессов.

На рис. 4 представлены результаты измерений массовой концентрации в аэрозольном шлейфе

в зависимости от расстояния вдоль направления распространения аэрозоля. Были использованы данные измерений для уровня 70–100 м от поверхности земли.

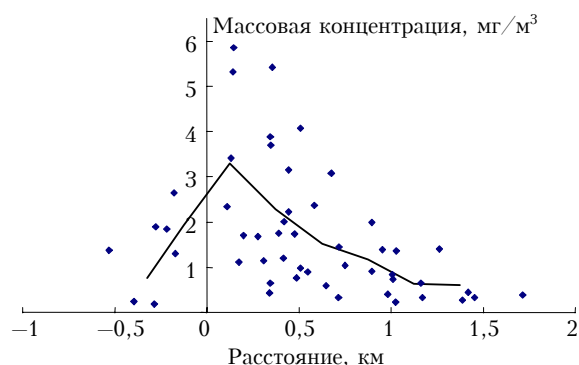


Рис. 4. Результаты лидарных измерений массовой концентрации цементной пыли на уровне 70–100 м от поверхности земли в зависимости от расстояния от группы труб (ромбы – отдельные измерения, линия – усредненная по интервалу 250 м зависимость)

Сплошная кривая показывает усредненную (по диапазону расстояний 250 м) зависимость. Расстояния отсчитываются от центра группы труб по направлению ветра, отрицательные расстояния относятся к данным с наветренной стороны. В диапазоне расстояний 1–1,5 км среднее значение массовой концентрации составило  $620 \text{ мкг/м}^3$ .

Сравним полученные результаты с данными расчетов и измерений, приведенными в [7]. Согласно экспериментальным данным [7], приземная концентрация примеси от цементного производства на расстояниях 1–2 км составляет  $2 \cdot 10^{-6} [\text{с/м}^3]M$ , где  $M [\text{г/с}]$  – величина выброса в единицу времени. В то же время по результатам численного моделирования на тех же расстояниях отношение концентраций примеси на уровне 80 м к приземной концентрации равно 3. Комбинируя эти данные и взяв полученную по данным предприятия оценку  $M = 90 \text{ г/с}$ , получим величину массовой концентрации  $540 \text{ мкг/м}^3$ , что находится в удовлетворительном согласии с результатами лидарных измерений.

### Выводы

Проведено поляризационное и трехволновое лидарное зондирование аэрозольных выбросов цементного предприятия. По результатам зондирования получено, что визуально наблюдаемая часть струи представляет собой плотное аэрозольное

образование с преобладанием водяных сферических частиц пара. Вне видимой части струи фиксируется наличие примеси, распространяющейся за счет турбулентной диффузии. Деполаризация сигнала от примеси составляет 40%, что соответствует данным ранее проведенных модельных экспериментов по обратному рассеянию от цементной пыли. По данным трехволнового зондирования, характерная величина эквивалентного радиуса пылевых частиц составляла  $(0,9 \pm 0,3) \text{ мкм}$ .

Проведена оценка массовой концентрации примеси. Сопоставление с опубликованными результатами измерений массовой концентрации примеси для цементного производства и данными численного моделирования показывает, что результаты лидарных и независимых измерений массовой концентрации находятся в удовлетворительном согласии. Из результатов проведенной работы следует, что исследованная в работе методика может применяться для контроля величины выбросов и определения зоны рассеяния аэрозольной примеси от цементного производства и других источников мелкодисперсной пыли.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ по проекту «Создание межвузовской системы учебно-научных центров коллективного пользования экологического мониторинга для устойчивого развития регионов» (2002–2004 гг.) и программе целевой финансовой поддержки для развития приборной базы научных исследований ЦКП при БелГУ (2004 г.).

1. Cook C.S., Bethke G.W., Conner W.D. Remote measurements of smoke plume transmittance using lidar // Appl. Opt. 1972. V. 11. N 8. P. 1742–1748.
2. EPA Electronic Code of Federal Regulations. 40-CFR. P. 60. Appendix A.
3. Пеннер И.Э., Шаманов В.С. Наземно-самолетное лазерное зондирование дымов электростанции // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 3. С. 338–345.
4. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В., Курков К.И., Цанев В.И. Лазерное зондирование индустриального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1986. 186 с.
5. Дрофа А.С., Коршунов В.А., Романов Н.П. Определение оптико-локационных характеристик пылевого аэрозоля // Тр. ИЭМ. 1996. Вып. 26(161). С. 24–30.
6. Mishchenko M.I., Travis L.D., and Lacis A.A. Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles. Goddard Institute for Space Studies. New York, 2004.
7. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1975. 448 с.

#### S.S. Khmelevtsov, V.A. Korshunov, V.M. Nikitin, V.V. Kobelev. Multiwavelength and polarization lidar sensing of industrial aerosol emissions.

Cement aerosol plume is probed by means of three-wavelength (355, 532 and 1064 nm) and polarization (532 nm) lidar measurements. The depolarization ratio of lidar signal from aerosol particles observed outside the visible part of the plume in the area of turbulent pollutant dispersion is near 40%. Characteristic equivalent radius of particles retrieved from lidar measurements of extinction coefficients is  $0.9 \text{ }\mu\text{m}$ . Mass concentration as a function of the distance from the aerosol source is presented. Lidar results of mass concentration measurements are in reasonable agreement with known published data of numerical modeling and *in situ* measurements.