

**С.М. Першин, А.В. Бухарин, В.С. Макаров, В.И. Кузнецов, И. Прохазка**

## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ПРОФИЛЬ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НАД ВОЛГОЙ**

Представлены некоторые результаты лидарного зондирования атмосферы над Волгой на маршруте Москва – Нижний Новгород – Москва в период с 28.06.93 по 07.07.93 г., полученные в ходе комплексной экологической экспедиции на теплоходе <Илья Репин> компактным аэрозольным лидаром с безопасным для глаз уровнем излучения. Сравнение сигнала обратного рассеяния, полученного в сопоставимых условиях натурального эксперимента, позволило выявить зоны с особо чистой и загрязненной аэрозолем атмосферой.

### **Введение**

Состояние атмосферы городов и проблема контроля степени ее загрязнения стала в последнее время одной из самых главных среди других задач мониторинга окружающей среды во многих странах. В Германии, например, эту проблему, из восьми других, считают главной более половины опрошенных в 1990 г. горожан [1]. В этой связи развитие методов и особенно компактных систем дистанционного контроля атмосферы является весьма актуальным и своевременным.

Возможность применения лидаров для контроля аэрозольного загрязнения атмосферы рассматривается во многих монографиях [2, 3]. В [4] показаны примеры использования лидара на автомобильном шасси для картирования аэрозольных полей, а также определения интенсивности выбросов из труб локальных источников загрязнений воздушных бассейнов гг. Кемерово и Павлодара.

В настоящей статье изложены результаты зондирования атмосферы вдоль р. Волги компактным лидаром [5, 6, 7] и представлены пространственно-временные вариации аэрозольных загрязнений вдоль всего маршрута следования теплохода <Илья Репин> и детальные профили на коротких отрезках в границах городов и промышленных центров. В некоторых случаях здесь было зарегистрировано значительное изменение сигнала обратного рассеяния, которое легко было идентифицировать с источниками локального загрязнения атмосферы, расположенными на берегу. Особый интерес представляет одновременная регистрация сигнала обратного рассеяния от дымового шлейфа вблизи устья трубы котельной элеватора в г.Рыбинске и нижнего его слоя – наиболее тяжелой фракции выброса, в области лидара на расстоянии 330 м.

Сравнение сигнала обратного рассеяния, полученного в сопоставимых условиях натурального эксперимента, позволило выявить в ходе экспедиции зоны с особо чистой и загрязненной аэрозолем атмосферой. При этом участки маршрута с чистой атмосферой (г.Плес, местечко <Хвойный Бор>) рассматриваются как базовые или фоновые для оценки степени аэрозольного загрязнения в промышленных центрах: Рыбинск, Тверь, Ярославль, Нижний Новгород.

В этой связи в статье обсуждается перспективность применения рассматриваемого компактного лидара для мониторинга среды обитания на уровнях энергии зондирования, сравнимых или меньших спектральной плотности энергии солнечного излучения в области исследуемого объекта.

### **Пространственно-временные вариации аэрозольного загрязнения атмосферы вдоль р. Волги**

**Методика измерений.** Использовался экспериментальный макет лидара на полупроводниковом лазере с квантовым счетчиком в приемном канале, технические характеристики которого приведены в [7]. Основными компонентами, входящими в него, являются оптический блок с приемопередающими объективами, электронный блок управления, система обработки и отображения информации на базе компактного компьютера. Макет лидара был разработан в ИКИ РАН при поддержке НПП <Алькор> на основе лидара-альтиметра для исследо-

вания атмосферы Марса в ходе проекта Марс-94/96. Оптический блок был закреплен на треноге с шаровым шарниром, позволяющим выбирать практически любые направления зондирования. Для оперативной настройки на исследуемый объект использовался телескопический визир, съюстированный параллельно оптической оси приемного канала лидара. Направление зондирования выбиралось так, чтобы максимально уменьшить влияние на регистрируемый сигнал шлейфа аэрозолей, образующихся при функционировании систем жизнеобеспечения, расположенных в передней и задней части судна. Высота размещения лидара над уровнем воды в зависимости от номера палубы могла изменяться от 2 до 13 м. Для более корректного сопоставления текущих результатов направление зондирования выбиралось параллельным поверхности воды.

В зависимости от фоновой засветки и объекта исследования в одном измерении использовалось от 32 000 до 1 024 000 импульсов лазера, что соответствовало времени измерения от 13 с до 6 мин при частоте посылки импульсов 2,5 кГц. За это время теплоход перемещался на расстояние до 3 000 м. Таким образом, сигнал обратного рассеяния мог усредняться по времени и по пространству одновременно.

Характерный вид сигнала обратного рассеяния при зондировании дымового шлейфа над устьем трубы котельной около элеватора в г. Рыбинске приведен на рис. 1 без коррекции на квадрат расстояния. Здесь первый пик несет информацию о степени аэрозольного загрязнения атмосферы, непосредственно прилегающей к лидару, а второй – о плотности и рассеивающих свойствах шлейфа или другого объекта. Общий профиль вариаций степени аэрозольного загрязнения атмосферы вдоль всего маршрута следования теплохода определялся по амплитудному значению первого пика в сигнале обратного рассеяния после обработки гистограмм. При этом значение коэффициента обратного рассеяния (КОР) определялось в соответствии с проведенной калибровкой лидара [7] по числу отсчетов в пятом канале гистограммы:  $\beta = K N_5 / N$ , где  $N_5$  – число сигнальных фотоотсчетов в 5-м канале восстановленной гистограммы при  $N$  включениях лазера;  $K = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$  – калибровочная константа.

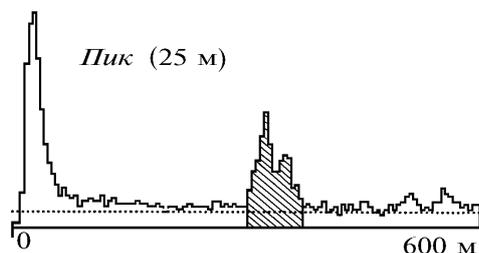


Рис. 1

Профиль КОР вдоль трассы зондирования вычислялся как из данных одной гистограммы, так и из серии измерений с перемещением строба вдоль трассы зондирования на большие расстояния.

Погрешность величины КОР определялась разбросом калибровочного коэффициента  $K$  (~15%) и дисперсией числа сигнальных фотоотсчетов в 5-м канале гистограммы. Следует особо подчеркнуть, что представленный коэффициент калибровки по 5-му каналу приведен в предположении однородной атмосферы. С целью определения степени нестационарности среды при оценке коэффициента обратного рассеяния проводился цикл измерений для каждого участка на пути следования теплохода. После этого вычислялись выборочные среднее и дисперсия числа сигнальных фотоотсчетов. Как правило, относительное среднее квадратическое отклонение по сериям измерений не превышало 15%, что и являлось фактическим значением степени нестационарности атмосферы за время измерения.

**Эксперимент.** На рис. 2 *а, б* представлены крупномасштабные пространственно-временные вариации коэффициента обратного рассеяния, полученные при зондировании атмосферы над водной поверхностью и в приземном слое вдоль маршрута Москва – Нижний Новгород (см. рис. 2, *а*) и Нижний Новгород – Москва (см. рис. 2, *б*) на теплоходе <Илья Репин> в период с 29.06.93 по 07.07.93 г.

Следует отметить, что сильные флуктуации обратного сигнала могут быть вызваны интенсивными выбросами из труб двигательных установок судов, непрерывно курсирующих вблизи теплохода. В ходе экспедиции однозначно было установлено увеличение лидарного сигнала после прохождения мимо теплохода <Илья Репин> с наветренной стороны любого грузо-пассажирского судна.

Большой разброс значений коэффициента обратного рассеяния во время стоянки в Нижнем Новгороде (см. рис. 2, *a*) в диапазоне  $4\div 20\cdot 10^{-6}\text{ м}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$  мы объясняем попаданием теплохода <Илья Репин> в зону шлейфа аэрозольных выбросов промышленных и других объектов города при направлениях ветровых потоков из города вдоль Оки на Волгу.

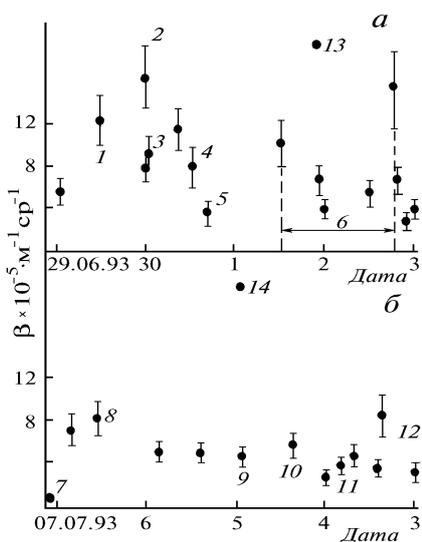


Рис. 2. Вариации измеренных значений КОР на маршруте Москва – Нижний Новгород – Москва в прямом (*a*) и обратном (*б*) направлениях: 1 – г. Калязин; 2, 3, 9 – Рыбинский шлюз; 4, 10 – Ярославль; 5, 11 – Плес; 6 – Нижний Новгород; 7 – Хвойный бор; 8 – Тверь; 12 – Кинешма; 13 – дымовой шлейф от проходящего судна; 14 – Нефтеналивной причал (Рыбинск)

Поскольку все измерения за время экспедиции проводились в сопоставимых погодных условиях в течение относительно короткого отрезка времени, то можно предположить, что большой уровень сигнала обратного рассеяния соответствует высокой концентрации аэрозоля в атмосфере [3]. В нашем случае это подтверждается совпадением уровня сигнала обратного рассеяния  $3,5\cdot 10^{-6}\text{ м}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$  при зондировании атмосферы в г. Плес на прямом (30.06.93 г.) и обратном (03.07.93 г.) курсе следования теплохода. Совпадение результатов, а также малое значение КОР указывают на высокую прозрачность и стабильность параметров атмосферы [2, 3], что скорее всего обусловлено отсутствием промышленных предприятий и других мощных источников локального загрязнения атмосферы в г. Плес. Этот факт в свете полученных результатов позволяет рассматривать значение КОР в г. Плес как базовое для сравнительного анализа степени аэрозольного загрязнения атмосферы других городов.

Так, из рис. 2, *a, б* видно, что атмосфера всех индустриальных центров по маршруту следования отличалась большим содержанием аэрозоля по сравнению с атмосферой над г. Плес. При этом пик аэрозольного загрязнения зарегистрирован вечером 02.07.93 г. в районе пассажирского порта во время стоянки в Нижнем Новгороде и на траверсе наливного порта г. Рыбинска (рис. 3 *a, б*).

По результатам измерений мелкомасштабных вариаций КОР в пределах городской зоны Нижнего Новгорода и Рыбинска (см. рис. 3 *a, б*), обнаружены корреляции величины обратного сигнала из атмосферы с расположением промышленных объектов на берегу с наветренной стороны. Такая корреляция проявлялась и при отходе от Нижнего Новгорода (см. светлые кружки с крестом на рис. 3, *a*), что подтверждает связь аэрозольного загрязнения с его источниками. При этом во многих случаях отдельные выбросы сигнала обратного рассеяния относительно среднего значения не сопровождались одновременным наблюдением визуальных неоднородностей в атмосфере. Так, увеличение сигнала обратного рассеяния более чем в 5 раз

относительно фонового вблизи нефтеналивного причала при входе в г.Рыбинск (см. рис. 3, б) сопровождалось запахом углеводородов при отсутствии каких-либо видимых изменений оптических характеристик атмосферы вдоль трассы зондирования. Флуктуации сигнала обратного рассеяния при подходе к Нижнему Новгороду (см. рис. 2, а) также не сопровождалось визуальным наблюдением шлейфов со стороны берега через Волгу, пересекаемых трассой зондирования.

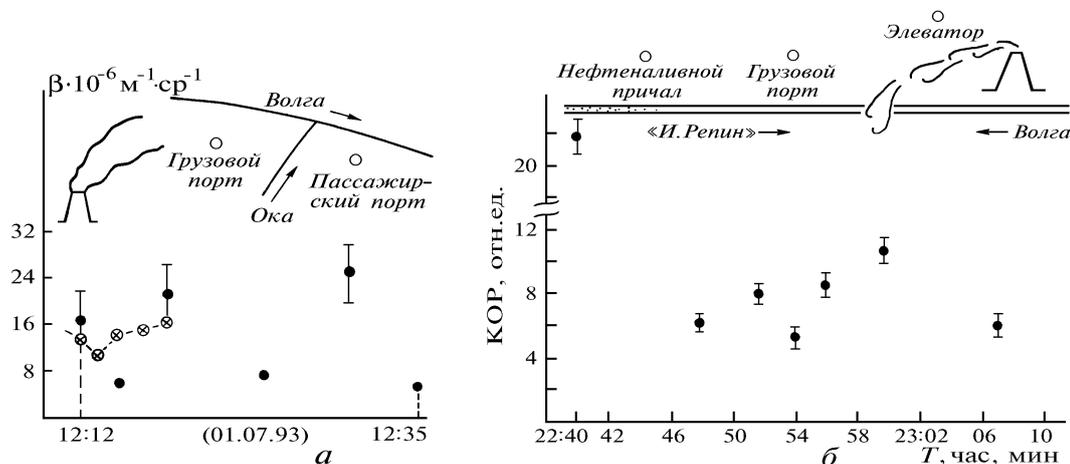


Рис. 3. Значения КОР на участках фарватера р.Волги; а – при входе (●) и выходе (⊗) из бухты Нижнего Новгорода; б – при пересечении г. Рыбинска

Следует также обратить внимание на корреляцию сигнала обратного рассеяния с изменением метеоусловий. Так, вблизи г. Калязин между двумя измерениями 29.06.93г., разделенными 20-минутным интервалом, прошел небольшой дождь. После обработки результатов зондирования было обнаружено уменьшение обратного сигнала в 9 раз, что наглядно иллюстрирует и подтверждает наблюдаемый нами ранее [5, 6] эффект вымывания аэрозольных частиц из атмосферы дождевыми осадками [3]. По-видимому, такие небольшие дожди на обратном пути следования и промывали атмосферу от аэрозольных загрязнений, уменьшая сигнал обратного рассеяния в целом (см. рис. 2, б).

Таким образом, представленные результаты показывают возможность регистрации относительного уровня аэрозольного загрязнения атмосферы промышленных центров портативным лидаром обратного рассеяния с безопасным уровнем излучения.

### Зондирование шлейфовых выбросов локальных источников

Наличие постоянно работающей силовой дизельной установки теплохода <Илья Репин> с выбросом отработанных газов позволяло в любое время в ходе экспедиции проводить проверку чувствительности и способности лидара детектировать практически невидимые атмосферные неоднородности над срезом трубы теплохода. Во время стоянки подобные наблюдения нам удавалось проводить при зондировании шлейфовых выбросов над трубами других теплоходов. При этом лидарный сигнал изменялся в соответствии с оборотами двигателей и их мощностью.

Один из профилей сигнала обратного рассеяния при зондировании шлейфа над трубой теплохода <Илья Репин> приведен на рис. 4, а. Для повышения статистической значимости результатов измерений в данном случае было использовано 256 000 лазерных импульсов. На гистограмме распределения числа отсчетов по дальности отчетливо наблюдаются два максимума. Первый из них, как упоминалось выше, обусловлен рассеянием фотонов в однородной атмосфере вблизи лидара, второй – рассеянием в шлейфе над срезом трубы теплохода. На рис.4, б представлен профиль коэффициента обратного рассеяния в этом шлейфе, вычисленный по полученным данным с учетом калибровки лидара [7]. Сравнительно небольшое значение КОР в шлейфе, сопоставимое с общим уровнем загрязнения атмосферы в г. Запорожье [3], соответствует коэффициенту экстинкции менее 0,5 1/км [3]. Отсюда следует, что зондируемый шлейф слабо поглощает излучение лидара и поэтому его легче заметить не по затемнению атмосферы, а по оптическим неоднородностям горячих газов над трубой, температурный градиент

которых, по-видимому, вносит свой вклад в сигнал обратного рассеяния. Из полуширины пика КОР на рис. 4, а, не превышающей существенно пространственный размер 100 нс лазерного импульса, следует, что толщина шлейфа вдоль линии зондирования много меньше 15 м.

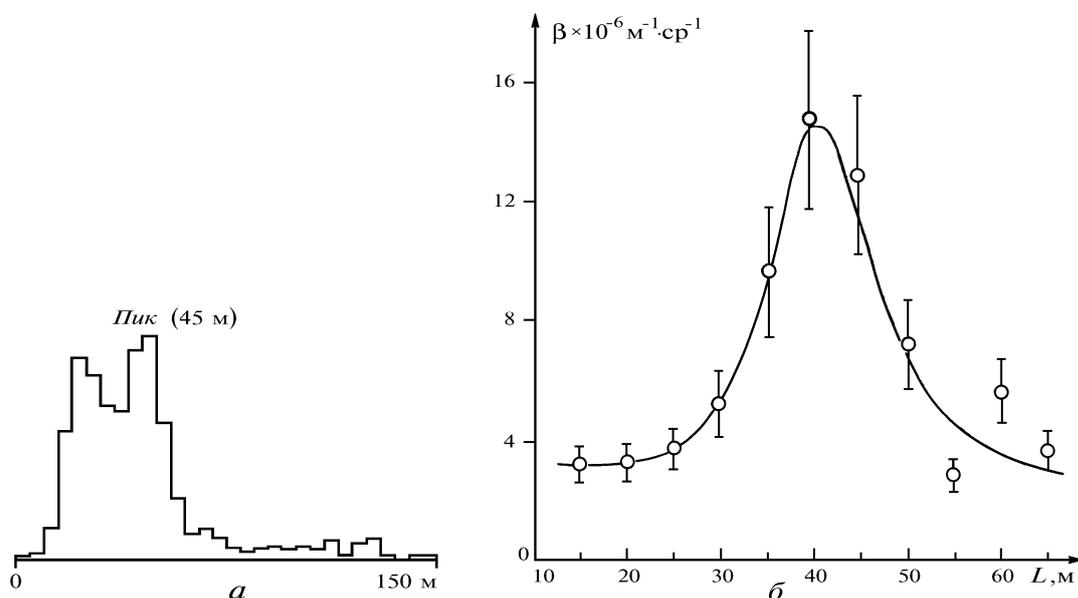


Рис. 4. Результаты зондирования выхлопа над устьем трубы двигательной установки теплохода <Илья Репин>: а – характерный вид сигнальной гистограммы распределения числа фотоотсчетов по каналам; б – профиль КОР вдоль трассы зондирования

Другой пример зондирования шлейфового выброса из трубы, удаленной на большее расстояние от лидара, показан на рис. 1. Наличие двух максимумов в сигнале обратного рассеяния (см. рис. 1), полученного от шлейфа вблизи среза трубы в течение 26 с измерения может быть обусловлено как нестационарностью и динамикой развития дымового шлейфа, так и слоистой структурой последнего. Для расчета физических величин в таких случаях необходима априорная информация о зондируемом объекте [3]. При ее отсутствии возможна только оценка величины нижней границы коэффициента обратного рассеяния и значения массовой концентрации выброса из трубы элеватора по известным соотношениям [3]. Так, в рассматриваемом случае массовая концентрация выброса составляет не менее  $69 \text{ мг/м}^3$  [3] без учета поправки на поглощение вдоль трассы зондирования, которую можно оценить по значению первого пика на рис. 1. Очевидно, что такая способность лидара особенно важна при зондировании удаленных объектов в замутненной поглощающей атмосфере.

Заметим, что здесь одновременно удалось зарегистрировать поперечный размер области выпадения наиболее тяжелой фракции из этого шлейфа, пересекаемой теплоходом при входе в г. Рыбинск. По изменению амплитуды первого сигнала в серии измерений в течение 10 мин движения теплохода (полуширина последнего пика на рис. 3, б) можно оценить, что размер этой области составляет не менее 3 км. Таким образом, данная труба как локальный источник загрязняет не только атмосферу, но и почву, воду в реке и жилые кварталы в радиусе 300 и более метров при изменении направления ветра.

## Заключение

Представленные результаты дистанционного зондирования атмосферы показывают реальные возможности использования портативного лидара обратного рассеяния для детектирования и сравнительного анализа аэрозольного загрязнения атмосферы на расстояниях в несколько сотен метров.

Предельно низкий уровень зондирующего излучения делает его преимущества особенно важными для мониторинга среды обитания, наиболее чувствительной к поражающему действию лазерного излучения. Поэтому представляется перспективным применение представленного в работе компактного лидара для зондирования атмосферы в населенных местах без рис-

ка нанесения ущерба окружающей среде. Полученные результаты открывают дополнительные возможности для разработки нового класса лидаров с безопасным уровнем излучения и необходимостью их метрологической аттестации [3].

Авторы весьма признательны А.И. Холодных за полезные замечания и обсуждения.

1. Гутен Таг. 1992. N 6. С. 26.
2. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
3. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1986. 186 с.
4. Балин Ю.С., Разенков И.А. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 2. С. 169 – 188.
5. Pershin S., Linkin V., Bucharin A. et al. // Proc. of the SPIE's, 1992, Intern. Symposium, Sun Diego. V. 1752. P. 293 – 298.
6. Pershin S., Linkin V., Bucharin A. et al. // Proc. of the SPIE's, 1993, CIS Selected Papers, Optical Monitoring of the Environment. V. 2107, P. 336 – 363.
7. Першин С.М., Бухарин А.В., Линкин В.М., Макаров В.С. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 4. С. 538 – 547.

Институт космических исследований  
РАН, Москва

Поступила в редакцию  
17 января 1994 г.

S.M. Pershin, A.V. Bukharin, V.S. Makarov, V.I. Kuznetsov, I. Prokhaska.  
**Spatio-Temporal Picture of the Atmospheric Pollution with Aerosols over Volga River.**

In this paper we present some results of lidar sounding of the atmosphere over Volga river on route from Moscow to Nizhnii Novgorod obtained during a complex ecological expedition on board a ship <Il'ya Repin> in the period from 06.28.1993 till 07.07.1993. The investigation has been carried out using a compact aerosol lidar with an eye-safe laser radiation. A comparison of lidar return signals obtained under similar conditions enabled us to reveal regions of especially clear (aerosol free) atmosphere and regions with aerosol pollutions. The atmosphere over certain portions of the route (for example, near small towns Ples and Khvoyni Bor) is considered as the reference or background atmosphere for assessing the degree of aerosol pollution of the atmosphere over industrial centers.