

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501.7

Б.Д. Белан, В.В. Бурков, М.В. Панченко, И.Э. Пеннер, Т.М. Рассказчикова, И.В. Самохвалов,
Г.Н. Толмачев, В.С. Шаманаев

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ
БОРТОВЫМ ЛИДАРОМ «МАКРЕЛЬ-2М»

Приводятся некоторые результаты лазерного зондирования промышленных выбросов в городах Дальнего Востока. Прослежено распространение шлейфов на расстояние до 22 км и показано, что на всем протяжении они сохраняют струйный характер. Выявлен характер распространения выбросов, когда их уровень совпадает с верхней границей инверсии. В этом случае шлейфы балансируют ниже и выше уровня инверсии. Зафиксированы случаи прорыва инверсии конвективными потоками.

Неблагоприятная экологическая обстановка, сложившаяся во многих промышленных районах страны, требует максимально полной и объективной информации о составе, характере и динамике выбросов загрязняющих веществ от объектов, расположенных на их территории. Эта ситуация явилась причиной того, что самолет-лаборатория ИОА СО АН СССР АН-30 «Оптик-Э» в 1989 году был переориентирован на проведение экологического обследования атмосферы над городами.

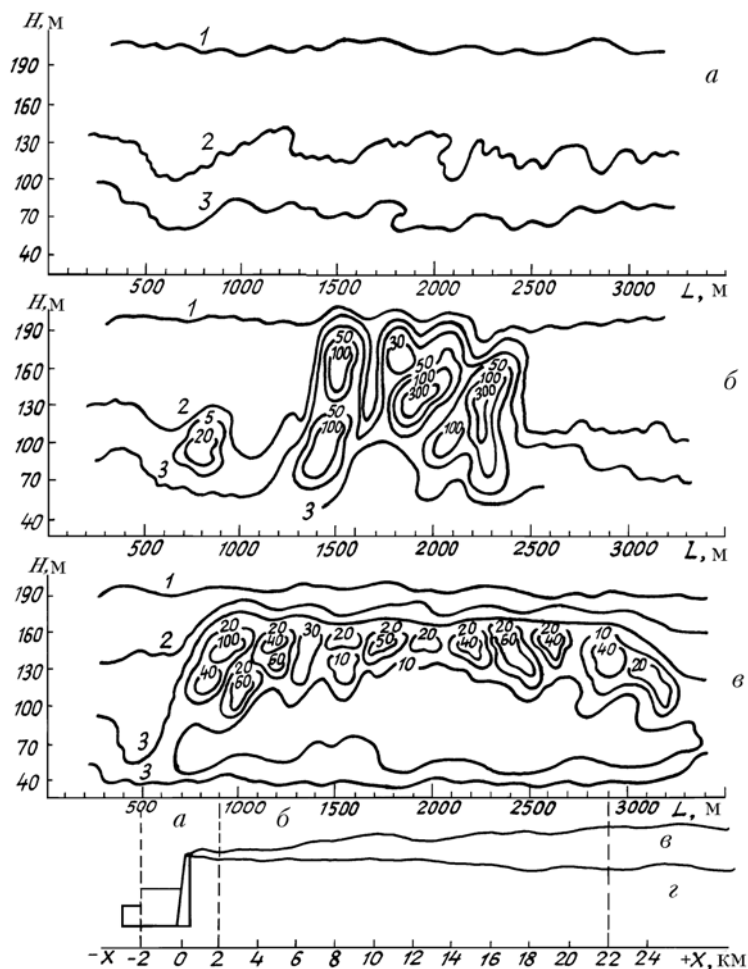


Рис. 1. Вертикальное распределение массовой концентрации (относительные единицы) аэрозоля в районе г. Амурска 18 декабря 1990 года: а — наветренная сторона; б — через 2 км от среза труб; в — через 22 км от среза труб; з — схема эксперимента

АН-30 «Оптик-Э», оснащенный контактными датчиками и средствами дистанционного зондирования [1], позволяет осуществлять комплексный контроль воздушного бассейна города и подстилающей поверхности.

В настоящей статье обсуждаются некоторые результаты исследования динамики шлейфов, полученные с помощью бортового лазерного локатора в ходе комплексного обследования городов Дальнего Востока.

Для зондирования атмосферы вертикально вниз по трассе полета использовался лидар «Макрель-2М» с диаметром приемного телескопа 0,2 м и энергией импульса 50 мДж на длине волны 532 нм. Система регистрации позволяла получать вертикальные разрезы атмосферы с разрешением от 5 до 100 м по горизонтали и от 1,5 до 15 м по вертикали [2].

Энергетический потенциал лидара позволял измерять профили коэффициента ослабления в оптически плотных дымовых шлейфах методом асимптотического накопления [3]. При зондировании менее плотных образований для вычисления коэффициента ослабления применялся метод послойного восстановления [3]. Лидарное отношение предполагалось постоянным вдоль трассы зондирования. Все наборы эхосигналов при каждом разрезе атмосферы записывались на гибкие магнитные диски.

Основные результаты, обсуждаемые в данной статье, связаны с изучением динамики шлейфов. В этой постановке в качестве первого приближения правомерно полагать, что сигналы обратного рассеяния пропорциональны массовой концентрации аэрозоля. (Применяемая нами методика оценки непосредственно массовой концентрации будет описана ниже). Из всего массива измеренных данных нами отобраны три характерных случая, которые наиболее ярко демонстрируют возможности лидара для изучения динамических процессов и не могут быть получены другими способами.

На рис. 1 показана трансформация шлейфа, выбрасываемого предприятиями г. Амурска (Хабаровский край), при его распространении в сторону Комсомольска-на-Амуре. Здесь нижняя часть рисунка (z) демонстрирует схему зондирования: разрез a выполнен с наветренной стороны г. Амурска на расстоянии 2 км от источников выбросов ($x = -2$ км); разрез b — на расстоянии 2 км от источника по направлению ветра ($x = +2$ км) и разрез $в$ — на удалении 22 км от источника ($x = +22$ км), на входе в г. Комсомольск-на-Амуре. Все разрезы выполнялись перпендикулярно направлению ветра с высоты полета 250 м. По данным термодинамического комплекса самолета-лаборатории инверсия температуры наблюдалась на высоте 190 м. Скорость и направление ветра определялись по навигационной системе самолета непосредственно в полете. Полученные в ходе полетов (штриховые линии a , b и $в$ на рис. 1, z данные о распределении сигналов обратного рассеяния представлены на рис. 1, a , b , $в$ соответственно. На всех рисунках в качестве единичной изограммы принято значение сигналов обратного рассеяния, соответствующих величине массовой концентрации $M = 0,01$ мг/м³.

Рис. 1, a показывает, что воздух, поступающий в г. Амурск, является чистым. Правда, под слоем инверсий наблюдается некоторое повышение концентрации аэрозоля, которое обусловлено естественными процессами. Кривые изограмм в этом слое отражают действие подстилающей поверхности, влияние которой не распространяется выше инверсии (кривая вблизи 200 метров более монотонна). Источники выбросов с этой стороны города отсутствуют.

Как показывает рис. 1, b , шлейф, выходящий из г. Амурска, остается достаточно компактным на расстоянии 2 км от города и объединяет в себе почти все выбросы. Он сосредоточен в слое 55–190 м и имеет ширину 1200 м. В то же время в поле массовой концентрации внутри шлейфа наблюдается несколько отдельных струй разной интенсивности (рис. 1). Сверху он ограничен слоем инверсии (190 м). Возмущений, расположенных выше инверсии единичной изограммы, не отмечается, что говорит о том, что выбросы на таком удалении от источника имеют температуру, близкую к температуре окружающего воздуха. На рис. 1, b можно выделить и вторичный, менее интенсивный источник, расположенный на высоте 100 м. Ниже 50 м источников взвешенных веществ вблизи г. Амурска не наблюдается.

Разрез (рис. 1, $в$), выполненный перпендикулярно направлению переноса на этой высоте, демонстрирует изменения, произошедшие внутри шлейфа, после прохода расстояния 20 км. С другой стороны, этот разрез дает представление о характеристиках воздуха, поступающего в Комсомольск-на-Амуре на его южной периферии. Из рис. 1, в видно, что шлейф расширился в 2 раза и его поперечный размер достиг 2500 м. Вместе с тем, вертикальная составляющая уменьшилась до 80–160 м. Налицо баланс между «всплыванием» шлейфа вверх и задерживающим действием инверсии. И наконец, несмотря на достаточно длительное время переноса шлейфа от Амурска до Комсомольска-на-Амуре (около 32 мин при скорости ветра 12 м/с), в нем сохранился струйный характер первоначальных выбросов. Концентрация аэрозоля внутри шлейфа уменьшилась в три раза, что, очевидно, обусловлено его расширением. Шлейф от вторичного источника, зафиксированный на разрезе рис. 1, b , на данном расстоянии не выявлен. Наиболее вероятно, что он объединился с основным шлейфом. На рис. 1, $в$ обращает на себя внимание обширная, относительно однородная область с концентрацией, очерченной изограммой 10. Ниже этой области проходит изограмма 3. Наличие области повышенных концентраций аэрозоля под шлейфом говорит о том, что в нем происходит интенсивное укрупнение частиц под действием коагуляционных и конденсационных процессов, что усиливает их гравитационное оседание. Процесс «высыпания» частиц прослеживается в слое от 130 до 45 м. По-видимому, оседающие частицы достигают поверхности ниже по потоку. Но этот процесс проследить не удастся, так как предприятия г. Комсомольска-на-Амуре вносят дополнительный вклад в загрязнение воздуха взвешенными веществами.

Описание динамики шлейфа в терминах обратного рассеяния позволяет достаточно детально дать представление о структуре пространственно-временного распределения примеси. Для расчетов антропогенной нагрузки конкретного загрязнителя и прогноза экологической ситуации в городе в целом, в практике природоохранных служб страны соответствующим ГОСТом предусмотрен весовой или гравиметрический метод. Переход от коэффициентов обратного рассеяния к величинам массовой концентрации аэрозоля сопряжен со значительными методическими проблемами, которые главным образом связаны с большим диапазоном изменчивости лидарного отношения в зависимости от микрофизического и химического состава зондируемых частиц [4].

Для оценки массовой концентрации по сигналам обратного рассеяния нами была применена процедура двойной передачи эталона.

Поскольку гравиметрический метод требует определенной временной экспозиции фильтра в потоке воздуха, то с учетом скорости самолета разумное для анализа количество частиц собирается на значительном пространстве на высоте полета самолета.

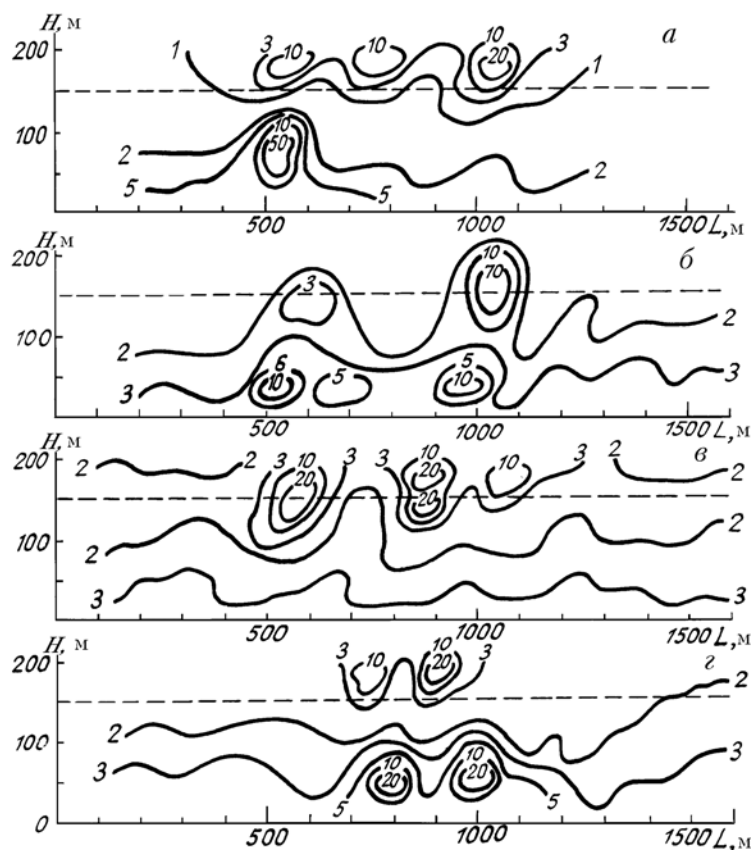


Рис. 2. Вертикальный разрез шлейфов ТЭЦ-1 г. Хабаровска 14 декабря 1990 года: а – 11 ч 30 мин; б – 11 ч 39 мин; в – 11 ч 46 мин; г – 12 ч 27 мин (время местное); сплошные линии – массовая концентрация аэрозоля (относительные единицы); штриховые – уровень инверсии

Рабочая зона лидара находится ниже заборного устройства фильтровентиляционной установки более чем на 30 м и в условиях сильной пространственно-временной изменчивости поля концентрации частиц не позволяет осуществить непосредственную градуировку осредненных при этом пролете лидарных эхосигналов с применением гравиметрии. Поэтому в используемой нами методике на первом этапе производилось вычисление коэффициента перехода от гравиметрии к осредненным значениям коэффициентов рассеяния, измеренных бортовым нефелометром, который работал в полете синхронно с фильтровентиляционной установкой. Эта операция выполнялась в каждом городе на разных высотах. Затем по данным о средних значениях коэффициента рассеяния на заданных высотах производилась оцифровка осредненных значений лидарного сигнала. По нашим данным, погрешность измерения массовой концентрации гравиметрическим методом не превышала 20%. Паспортная погрешность регистрации (не более 10%) определена сигналом нефелометрической установки, пропорциональным коэффициенту рассеяния. Ошибка, с которой регистрируется сигнал обратного рассеяния, составляет около 25%. Таким образом, двойная передача эталона от весового метода к лидарному приводит к тому, что лидарные данные о массовой концентрации аэрозоля получают с оценочной погрешностью около 35%. Необходимо подчеркнуть, что при использовании такой процедуры основная ошибка определения массовой концентрации носит систематический характер и именно поэтому в

данной работе динамика шлейфов описана в условных единицах лидарного сигнала, который позволяет дать более детальное представление о пространственно-временной структуре изучаемого явления.

Второй результат, на который необходимо обратить внимание, наблюдался в г. Хабаровске при зондировании шлейфов ТЭЦ–1, которые выбрасываются одновременно из 4 труб, имеющих одинаковую высоту. В период наблюдений высота выбросов оказалась близкой к верхней границе инверсии, зарегистрированной на 175 м.

Зондирование велось с высоты 250 м. Самолет проходил на расстоянии 400–500 м от среза труб перпендикулярно направлению ветра. Всего было сделано 17 заходов на ТЭЦ–1 в течение 2,5 ч. Четыре из полученных разрезов приведены на рис. 2. Наиболее важным результатом, представленным на рис. 2, является зафиксированный процесс «биения» вертикальной структуры шлейфов (во времени и пространстве) на границе температурной инверсии.

Из рис. 2, *а* видно, что в начальный период зондирования в 11 ч 31 мин местного времени три шлейфа из 4-х находились выше инверсии, а один распространялся под нею вблизи уровня 50 м. Через 8 мин (рис. 2, *б*) на уровне инверсии остался только один шлейф, два опустились в приземный слой, их ядра зафиксированы на высоте 20–30 м. Четвертый же шлейф расщепился на два. Один след наблюдается на уровне инверсии, другой в приземном слое. Причем расщепление сказалось и на концентрации взвешенных веществ. Еще через 7 мин (рис. 2, *в*), все четыре шлейфа поднялись над инверсией или достигли ее уровня. При этом один из шлейфов «поднырнул» под другой.

Данные, приведенные на рис. 2, *а–в*, показывают, что процесс колебания высоты шлейфов составляет период порядка нескольких минут. Вместе с тем такого рода колебательный процесс достаточно устойчив во времени, что демонстрирует рис. 2, *г*, полученный через час после начала зондирования. Из рис. 2, *г* видно, что балансирование шлейфов возле уровня инверсии продолжалось: два шлейфа опустились к земле, а два распространялись над инверсией. Кроме вертикальной динамики шлейфов, результаты зондирования, приведенные на рис. 2, позволяют выявить вариации концентрации взвешенных частиц, значительно превышающие возможные ошибки измерений. Измерение сигналов в шлейфах достигает 20 раз. Прямые пролеты самолета-лаборатории через шлейфы подтверждают наличие значительной изменчивости концентрации частиц как по данным фотоэлектрического счетчика, нефелометра, так и гравиметрии. Проведенные оценки показывают, что эти вариации не связаны с изменением площади сечения шлейфов. Наиболее вероятно, что в период проведения эксперимента на ТЭЦ–1 происходило изменение режима технологических процессов. В этом убеждают результаты зондирования ТЭЦ–2 и ТЭЦ–3, где таких вариаций не зафиксировано.

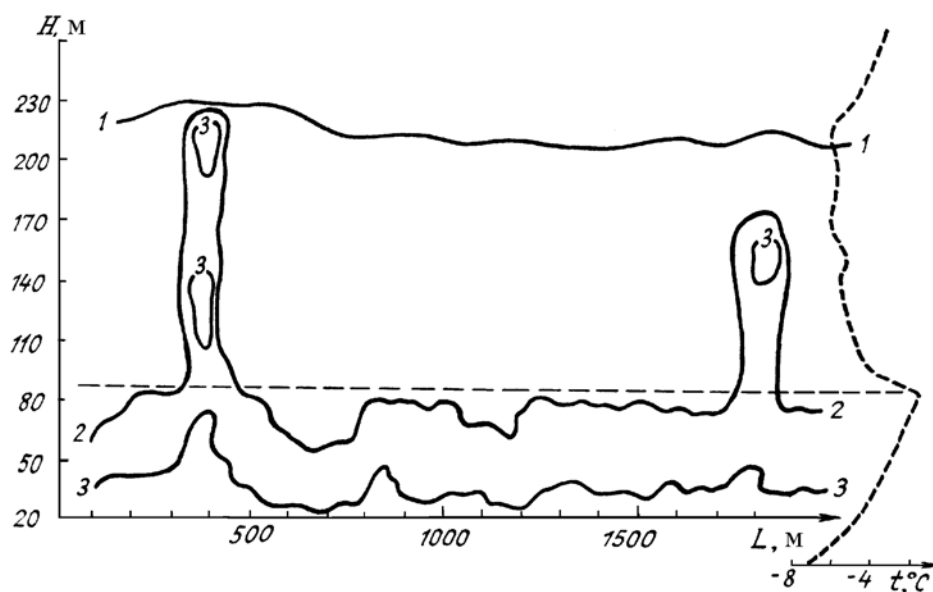


Рис. 3. Вертикальный разрез массовой концентрации аэрозоля (относительные единицы) — сплошные линии, вертикальное распределение температуры воздуха — штриховые, над г. Комсомольском-на-Амуре 17 декабря 1990 года

Как видим из приведенных выше данных, приземные инверсии температуры в значительной мере определяют характер распространения и динамику шлейфов и способствуют накоплению взвешенных веществ в приземном слое воздуха. Общепринято, что наличие температурной инверсии создает практически непреодолимую преграду для выбросов вещества от источников, расположенных под их верхней границей [5]. В то же время имеются немногочисленные работы, в которых отмечаются факты проникновения загрязнений через инверсионный слой [6, 7]. В процессе самолетного зондирования

удалось зафиксировать ярко выраженный случай проникновения аэрозольных частиц через слой инверсии.

Этот случай показан на рис. 3. Зондирование выполнялось 17 декабря 1990 года над г. Комсомольском-на-Амуре с высоты 300 м через сутки после смены воздушной массы. Как было показано ранее, за сутки аэрозольный режим не успевает установиться [8]. Поэтому на разрезе массовая концентрация имеет невысокие значения. В период эксперимента над городом имелось две инверсии, что видно из графика вертикального профиля температуры воздуха, помещенного в правой части рис. 3, снятого бортовым термодинамическим комплексом перед выходом на трассу зондирования. На рис. 3 показан лишь фрагмент вертикального разреза, сделанного через весь город, протяженность которого более 20 км. Из рисунка видно, что приземная инверсия, верхняя граница которой располагалась вблизи 90 м, действительно способствует накоплению взвешенных веществ — изограммы расположены близко друг от друга. В то же время на расстоянии 1400 м между собой выделяются два прорыва аэрозоля через слой инверсии, один из которых достигает основания второй приподнятой инверсии. Всего же на отрезке 20 км было зафиксировано 9 таких прорывов, расстояние между которыми изменялось от 1400 до 2400 м.

К сожалению, отсутствие детальных сведений о пространственном распределении вертикального профиля температуры не позволяет однозначно определить механизм прорыва инверсионного запирающего слоя — происходит это за счет локального перегрева выброса или здесь действуют иные динамические факторы.

В заключение настоящего сообщения отметим, что здесь приведены некоторые фрагменты результатов работы, наиболее ярко иллюстрирующие достоинства дистанционных методов зондирования в сочетании с контактными, объединенными в комплексе самолета-лаборатории. Необходимо подчеркнуть, что, по крайней мере, два из трех обсуждаемых выше результатов другими средствами не могут быть получены.

В первой публикации по данному вопросу авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую признательность председателю Хабаровского краевого комитета охраны природы и рационального природопользования А.А. Коленченко, коллективам краевого и городских комитетов по охране природы гг. Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре, являющихся инициаторами работ и оказавших большую организационную и материальную поддержку.

1. Самолет-лаборатория АН-30 «Оптик-Э» // 11роспект. // Томск: ТНЦ СО АН СССР, 1990. 24 с.
2. Абрамочкин А.И., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 3. С. 329–331.
3. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Под ред. М.В. Кабанова // Новосибирск: Наука, 1986. 108 с.
4. Ивлев Л.С., Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей // Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 360 с.
5. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов // Л.: Гидрометеониздат, 1980. 184 с.
6. Garland J. A., Branson J. R. // Atmos. Environ., 1976. V. 10. № 4. P. 353.
7. The OECD programme on long range transport of air pollutants. Measurements and findings // Paris, 1977. 47 p.
8. Белан Б.Д., Задде Г.О., Пхалагов Ю.А., Рассказчикова Т.М. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. № 6. С. 622.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
29 мая 1991 г.

**B. D. Belan, V. V. Burkov, M. V. Panchenko, I. E. Penner,
T. M. Rasskazchikova, I. V. Samokhvalov, G. N. Tolmachev, V. S. Shamanaev.
Some Results of Sensing Industrial Emissions into the Atmosphere Obtained with the Airborne Lidar «MAKREL-2M».**

Some results of laser sensing of industrial emissions over Far Eastern cities of the USSR are presented. Spreading of stack plumes has been tracked at distances to 22 km from the sources. It was shown that the spreading has a jetlike character. It was also revealed in this study that when the plumes reach the upper boundary of temperature inversion they balance around this level. In some cases the breakthroughs of the plumes through the inversion layer were observed due to convective air flows.