

Ю.С. Балин, А.Д. Ершов, А.И. Бриль<sup>1</sup>, В.П. Кабашников<sup>1</sup>, В.М. Попов<sup>1</sup>,  
А.П. Чайковский<sup>1</sup>

## Исследование распространения примеси от импульсного источника в турбулентной атмосфере

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия*

<sup>1</sup> *Институт физики НАНБ, г. Минск, Беларусь*

Поступила в редакцию 21.09.2001 г.

На основе натуральных и численных экспериментов исследовано распространение примеси от импульсного источника аэрозолей. Полевой эксперимент проводился в летнее время в степной местности с использованием аппаратуры дистанционного и локального контроля. Источником примеси служил заряд с индикаторным веществом, подрываемым на высоте 10 м.

Слежение за образовавшимся облаком конденсированной фазы продуктов взрыва производилось с помощью сканирующего лидара. Фиксировались отношение сигнала обратного рассеяния от облака к сигналу от фонового аэрозоля, а также время и координаты точек зондирования. В 25–30 м от места взрыва находилась ультразвуковая метеостанция, измеряющая температуру воздуха, вертикальную и горизонтальную составляющие скорости ветра и его направление, полную энергию турбулентных движений, величину касательного турбулентного напряжения трения, вертикальный турбулентный поток тепла.

Экспериментальные данные сопоставлялись с результатами численного моделирования пространственного распределения примеси, которое проводилось с использованием статистической гауссовой модели. Результаты расчетов в целом удовлетворительно согласуются с экспериментом.

### Введение

Рассеяние выбросов от непрерывных или импульсных источников зависит от многих взаимосвязанных факторов: физической или химической природы вещества, метеорологической обстановки (температурная и ветровая стратификация атмосферы), высоты размещения источника относительно препятствий движению воздушного потока, топографии местности и т.д.).

При мониторинге атмосферы, связанном с оценкой качества воздушного бассейна, контроль за выбросами, в большинстве случаев, осуществляется с помощью стационарных или мобильных наземных средств. К сожалению, эти средства не обеспечивают необходимого пространственно-временного разрешения, тем более осуществляется контроль только приземного слоя атмосферы.

Ситуация усугубляется еще больше, если возникает необходимость контроля последствий воздействия на окружающую среду техногенных примесей в пограничном слое атмосферы (взрывы, распыление различных веществ с самолетов, аварии крупных промышленных установок и т.д.). Поднимаясь в атмосферу до высот 0,3–1 км, аэрозольно-газовое облако трансформируется атмосферной турбулентностью и перемещается в направлении ветра от источника, оседая на поверхность земли. Распространение облака часто носит случайный характер, поэтому заранее расположить на пути следования облака необходимое

количество наземных пунктов контроля представляется проблематичным.

Наиболее приемлемыми средствами контроля в данной ситуации являются устройства, основанные на использовании методов дистанционного бесконтактного определения параметров выбросов (активное и пассивное зондирование), обеспечивающие возможность получения необходимой информации с высокой оперативностью и на значительных пространственных масштабах. С использованием методов пассивного зондирования атмосферная диффузия примесей от мгновенного источника изучалась в довольно большом количестве работ [1–4, 6]. Однако данные методы позволяют фиксировать мгновенное изображение облака только в одной плоскости, давая двумерное распределение концентрации примесей по полю зрения объектива.

Активное зондирование, в частности сканирующий лидар, позволяет устранить этот недостаток, давая возможность регистрировать картину трехмерного распределения концентрации примесей, т.е. определять структуру объекта как по внешним границам, так и по его глубине. Наконец, с помощью лидара можно следить за облаком и в тех случаях, когда визуально или фотографически оно не наблюдается, например в ночных условиях, при малых концентрациях примеси или слабом контрасте облака на фоне окружающей среды. Пример подобного применения лидара при зондировании аэрозольной эмиссии, образуемой при взрыве, был продемонстрирован Коллисом еще в 1968 г. [5]. Тем не менее до сих пор довольно мало

публикаций об экспериментах по использованию лидаров для исследования распространения примесей в пограничном слое атмосферы. Об одном из них пойдет речь в настоящей статье, где описаны результаты натуральных измерений динамики распространения облака продуктов взрыва и проведено их сопоставление с расчетными данными.

## Описание эксперимента

Натурные эксперименты по исследованию процессов распространения примесей проводились в июне 1999 г. в степной местности с редкой растительностью в условиях стабильного антициклона. Эти условия характеризовались солнечной безоблачной погодой и устойчивой суточной динамикой метеорологических и турбулентных параметров атмосферы. В данной статье представлен один из типичных экспериментов, осуществленный 8 июня в 17 ч 37 мин местного времени.

В состав измерительного комплекса входили аппаратура дистанционного зондирования и ультразвуковая метеостанция БМК-01, регистрирующая метеорологические и турбулентные параметры атмосферы в локальном объеме приземного слоя атмосферы.

Лидар располагался на удалении 770 м от подрывной мачты в заднем секторе от предполагаемого направления распространения продуктов взрыва. Источником примеси служил заряд (эквивалент 10 кг тротила), подрываемый на высоте 10 м. В качестве примеси использовалось специальное индикаторное вещество, позволяющее из регистрации следа облака на поверхности земли наземными датчиками отсементировать осадение продуктов взрыва от влияния естественного аэрозоля. В эксперименте был задействован малогабаритный сканирующий одночастотный лидар «ЛОЗА-М», зондирующий атмосферу на длине волны 532 нм с пространственным разрешением 7,5 м и угловым разрешением 10 угл. мин. Энергия в импульсе составляла 25 мДж, частота повторения импульсов 5 Гц. Предельная дальность зондирования была равна приблизительно 3 км.

Слежение за образовавшимся облаком конденсированной фазы продуктов взрыва велось в течение 6 мин. За время наблюдения облако удалилось от места взрыва на расстояние порядка 2 км и достигло высоты более 200 м.

В задачи лидарных наблюдений входило, во-первых, получение пространственных разрезов облака в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Это позволяет фрагментарно и в целом представить пространственно-временную картину распространения шлейфа, а оценив скорость и направление сноса, определить величину углового расширения шлейфа на всех этапах его трансформации, найти проекцию следа облака на земной поверхности и т.д. Второй задачей являлось определение внутренней структуры в различные моменты времени по мере удаления от точки взрыва. Опуская методические подробности, связанные с проблемой обращения данных зондирования

относительно оптических параметров, а затем массовой концентрации аэрозоля (достаточно подробно эта проблема изложена в [12, 13]), отметим, что в данном случае можно ограничиться информацией об отношении амплитуд лидарных сигналов от фоновой атмосферы и атмосферы, возмущенной влиянием продуктов взрыва.

Перед началом эксперимента лидар осуществлял зондирование в передней полусфере, тем самым определяя в выделенных секторах фоновые оптические параметры атмосферы. В дальнейшем с момента взрыва проводилось сканирование зондирующими импульсами в горизонтальной плоскости, при этом соседние направления отстояли друг от друга на угол 0,1–0,5°. Сканирование осуществлялось до тех пор, пока наблюдался эхосигнал от шлейфа. Затем лидар изменял направление зондирования в вертикальной плоскости на 0,5–1° и вновь проводилось горизонтальное сканирование атмосферы в обратном направлении. При каждом выстреле лазера в память ЭВМ с датчиков угла места и азимута поворотной колонки заносились информация о направлении зондирования, оцифрованные значения амплитуд лидарных сигналов и текущее время. Таким образом, путем последовательного набора азимутальных сечений под различными углами места получалось пространственное картирование шлейфа.

Поскольку объект исследований представляет собой нестационарное образование аэрозольных частиц от импульсного источника, то, зная дистанцию перемещения и интервал времени наблюдений, можно оценить горизонтальный и вертикальный компоненты скорости сноса, а также направление перемещения облака аэрозолей.

Ультразвуковая метеостанция БМК-1 [14] находилась в 25–30 м от места взрыва. С ее помощью на высоте 2,5 м измерялись средние и мгновенные значения температуры воздуха, вертикальной и горизонтальной составляющих скорости ветра и его направления, что позволило определить полную энергию турбулентных движений, величину касательного турбулентного напряжения трения, вертикальный турбулентный поток тепла, масштаб Монина – Обухова, структурные функции флуктуаций температуры и скорости, коэффициенты турбулентного обмена тепла и импульса.

## Математическая модель

Для математического моделирования распространения облака использовалась гауссова статистическая модель [6, 7], согласно которой средняя (по ансамблю) концентрация  $c$  в мгновенно возникшем облаке примеси может быть оценена по формуле

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} S_x(t) S_y(t) S_z(t)} \times \exp \left[ -\frac{x^2}{2S_x^2(t)} - \frac{y^2}{2S_y^2(t)} - \frac{z^2}{2S_z^2(t)} \right], \quad (1)$$

где  $x, y, z$  – координаты, отсчитываемые от центра тяжести облака;  $S_x(t), S_y(t), S_z(t)$  – среднеквадратические размеры облака, зависящие от времени  $t$ , прошедшего с момента выброса;  $Q$  – суммарная масса выброса примеси.

Поскольку основную часть времени облако движется значительно выше приземного слоя (высоту последнего можно оценить, например, по [10]) в области квазиоднородной турбулентности, где вертикальный размер облака может быть оценен по формуле [6–9]:

$$S_z^2(t) = S_z^2(0) + \Delta S_n^2(t_k) + 0,5 D_v^E(\delta_k)(\tau_L^w)^2 [1 - \exp(-\eta)]^2 + 2(\omega \tau_L^w)^2 [\eta - 1,5 - 0,5 \exp(-2\eta) + 2 \exp(-\eta)], \quad (2)$$

где  $t_k$  – момент выхода облака из приземного слоя;  $D_v^E(\delta_k)$  – эйлерова структурная функция скорости,  $\delta_k = S_z(t)$ ;  $\tau_L^w$  – лагранжево время корреляции вертикальной компоненты скорости жидкой частицы;  $\omega$  – среднеквадратическое значение турбулентных пульсаций вертикальной компоненты скорости;

$$\eta = (t - t_k) / \tau_L^w; \quad (3)$$

размеры в горизонтальной плоскости определяются выражениями, аналогичными (2).

Поскольку реальный прибор может регистрировать концентрацию, не превышающую некоторого значения  $c_{\min}$ , то наблюдаемые размеры облака и суммарная масса выброса примеси будут отличаться от реальных. Наблюдаемую массу облака можно найти интегрированием концентрации по области пространства, ограниченной условием  $c \geq c_{\min}$ . Квадрат наблюдаемого характерного размера облака может быть определен как интеграл от произведения концентрации на квадрат координаты по указанной выше области пространства, поделенный на наблюдаемую массу. В рамках гауссовой статистической модели наблюдаемая масса выброса  $M$  определяются выражением

$$M = Qm, \quad (4)$$

где

$$m = \int_0^g \exp(-\xi) \operatorname{erf}(\sqrt{g-\xi}) d\xi, \quad (5)$$

$$g = \ln [Q/c_{\min} (2\pi)^{3/2} S_x S_y S_z]. \quad (6)$$

Наблюдаемые среднеквадратические размеры облака

$$R_i = S_i \sqrt{1-f/m}, \quad (7)$$

где  $i$  символизируют  $x, y, z$ ;

$$f = 4(3\sqrt{\pi})^{-1} g^{3/2} \exp(-g). \quad (8)$$

С ростом размеров облака величина параметра  $g$ , зависящего от отношения концентрации в центре облака к минимально обнаружимой, уменьшается. При этом наблюдаемые размеры  $R_i$  и масса облака  $m$  все больше отличаются от реальных. При  $g$ , равном нулю, облако перестает быть заметным.

## Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

Экспериментальные данные представляют собой массив концентраций с указанием для каждой концентрации значений трех пространственных координат и времени. Одна из особенностей лидарного зондирования состоит в том, что разные области пространства просматриваются в разное время. Для того чтобы создать полную пространственную картину, надо брать данные из некоторого конечного временного интервала  $T$ . Это может приводить к ошибкам, связанным как с нестационарностью объекта, так и с недостаточной величиной указанного интервала.

Оценим ошибки, возникающие при попытке оценить размеры облака по данным зондирования, на примере гауссовой статистической модели, полагая, что лидар может зарегистрировать любую сколь угодно малую концентрацию. Рассматривается периодическая по времени схема зондирования, единичный цикл которой состоит в дискретном переборе углов места в пределах, превышающих вертикальный угловой размер облака.

Предполагается, что при каждом значении угла места проводится серия измерений с различными азимутальными углами, диапазон которых перекрывает горизонтальный угловой размер облака. Каждому выстрелу в плоскости объекта может быть сопоставлена элементарная площадка  $\Delta y \Delta z$ , через центр которой проходит зондирующий импульс, равная произведению угловых шагов, умноженных на расстояние до объекта.

Размер облака попытаемся оценить по формуле

$$\overline{x_i^2} = \frac{1}{M_{\text{exp}} T} \int dx dy dz x_i^2 \int_{t-T/2}^{t+T/2} d\tau c_{\text{exp}}(x, y, z, \tau), \quad (9)$$

где

$$M_{\text{exp}} = \frac{1}{T} \int dx dy dz \int_{t-T/2}^{t+T/2} d\tau c_{\text{exp}}(x, y, z, \tau); \quad (10)$$

$T$  – интервал времени осреднения экспериментальных данных; ось  $x$  совпадает с направлением на облако;  $c_{\text{exp}}$  – экспериментально измеряемая концентрация. В рамках гауссовой модели и принятой схемы зондирования для облака, движущегося со скоростью  $U$  вдоль оси  $x$ , имеем

$$c_{\text{exp}}(x, y, z, t) = \sum_k \delta(t - t_k) Q [(2\pi)^{1/2} R_x]^{-1} \times$$

$$\times \exp \left\{ - (x_j - Ut)^2 / 2R_x^2 \right\} f_{yz}(k), \quad (11)$$

где  $k$  нумерует зондирующие импульсы;  $x_j$  – координата центра интервала, в который попадает  $x$ . Длина указанного интервала  $\Delta x$  равна величине пространственного разрешения вдоль направления зондирования:

$$f_{yz}(k) = \begin{cases} [(2\pi) R_y R_z]^{-1} \exp \left\{ - y_k^2 / 2R_y^2 - z_k^2 / 2R_z^2 \right\} \\ 0 \end{cases}, \quad (12)$$

$f_{yz}(k)$  отлична от нуля и принимает значение, указанное в первой строчке, если только  $y, z$  попадают в площадку, сопоставляемую с  $k$ -м выстрелом. Выражение (11) моделирует лидарные экспериментальные данные и учитывает упомянутую выше особенность лидарного зондирования, состоящую в том, что в определенный момент времени имеются данные только из одной точки картинной плоскости и данные из другой точки картинной плоскости относятся к другому времени.

Будем считать для простоты, что шаги интегрирования  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  постоянны, а размеры облака не меняются со временем. Подставляя (11) в (9) и меняя порядок интегрирования по пространственным переменным и времени, получаем

$$M_{\text{exp}} = Q \sum_{k=k1}^{k2} [(2\pi) R_y R_z]^{-1} \times \exp \left\{ - y_k^2 / 2R_y^2 - z_k^2 / 2R_z^2 \right\} \Delta y \Delta z; \quad (13)$$

$$\overline{x^2} = R_x^2, \quad (14)$$

$$\overline{y^2} = \frac{Q}{M_{\text{exp}}} \sum_{k=k1}^{k2} [(2\pi) R_y R_z]^{-1} y_k^2 \times \exp \left\{ - y_k^2 / 2R_y^2 - z_k^2 / 2R_z^2 \right\} \Delta y \Delta z, \quad (15)$$

где  $k1$  и  $k2$  – номера импульсов, соответствующих временным границам интервала усреднения. Выражение для  $\overline{z^2}$  записывается аналогично (15).

Согласно (14) продольный размер восстанавливается точно по данным любого одного выстрела, сделанного в область концентраций, значительно превышающих минимально обнаруживаемую. Из выражения (15) видно, что значения  $\overline{y^2}$  и  $\overline{z^2}$  зависят от текущего времени и интервала  $T$  через зависимость от времени граничных номеров импульсов  $k1$  и  $k2$ .

Численные оценки делались для прямоугольной области сканирования в плоскости  $(yz)$  размером  $5R_y \times 5R_z$ . Облако находилось в центре указанной области,  $\Delta y = 0,5R_y, \Delta z = 0,5R_z$ . Все времена отнесены ко времени одного просмотра области сканирования (ко времени единичного цикла), а восстанавливаемые значения размеров к их «истинным» среднеквадратическим значениям. Из рис. 1 видно, что для оценки горизонтального размера нужны данные из временного интервала  $T$  порядка или больше времени одного го-

ризонтального скана, а для оценки вертикального размера нужны данные из временного интервала  $T$  порядка или больше времени единичного цикла. В данном примере первое время в 10 раз короче второго.

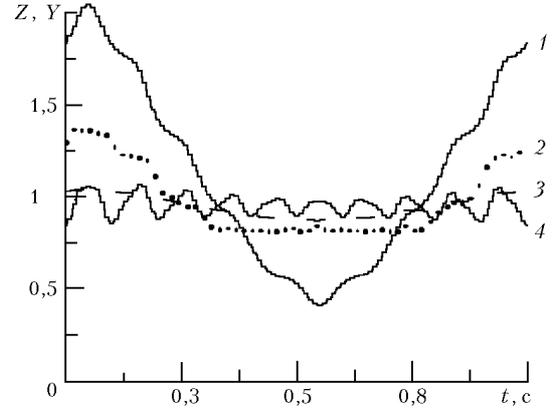


Рис. 1. Отношения размеров, восстановленных из данных, моделирующих эксперимент, к «истинным» размерам в зависимости от времени, отнесенного ко времени одного скана поля зрения: 1–3 – вертикальный размер; 4 – горизонтальный размер; 1, 4 –  $T = 0,33$ ; 2 – 0,7; 3 – 2,5 с

В рассматриваемом эксперименте время одного просмотра области сканирования росло со временем приблизительно от 0,5 до 1 мин. В соответствии с этим при сопоставлениях с расчетом временной интервал усреднения экспериментальных данных полагался равным  $T = 30 + 0,1t$ . Брать больший интервал усреднения нежелательно, так как облако за время  $T$  может заметно изменить свои размеры. При получении статистических характеристик облака, относящихся к фиксированному моменту времени  $t$ , брались все концентрации, измеренные в конечном интервале времени от  $t - T/2$  до  $t + T/2$ , и соответствующие им координаты. Затем область пространства, содержащая все координаты, разбивалась на элементарные прямоугольные параллелепипеды, в среднем содержащие достаточно много точек. Для вычисления интегралов значения функций, усредненные в пределах каждого параллелепипеда и умноженные на его объем, суммировались по всем параллелепипедам. Таким образом, находились координаты центра тяжести облака и его среднеквадратические размеры вдоль среднего направления ветра  $R_x^2$ , поперек ветра  $R_y^2$  и вертикальный размер  $R_z^2$ . Область интегрирования по пространству разбивалась на 27, 125 и 1000 элементарных параллелепипедов.

Общее представление о геометрических характеристиках облака можно получить из рис. 2, где приведены координаты  $(x, y)$  и  $(x, z)$  точек зондирования в течение всего эксперимента. Каждый трек, состоящий из точек вдоль отрезка прямой линии, соответствует отдельному выстрелу. Сплошные кривые на рис. 2 есть проекции траектории центра тяжести облака на горизонтальную и вертикальную плоскости, рассчитанные по экспериментальным данным.

В качестве исходных данных для расчета использовались экспериментально измеренные температура

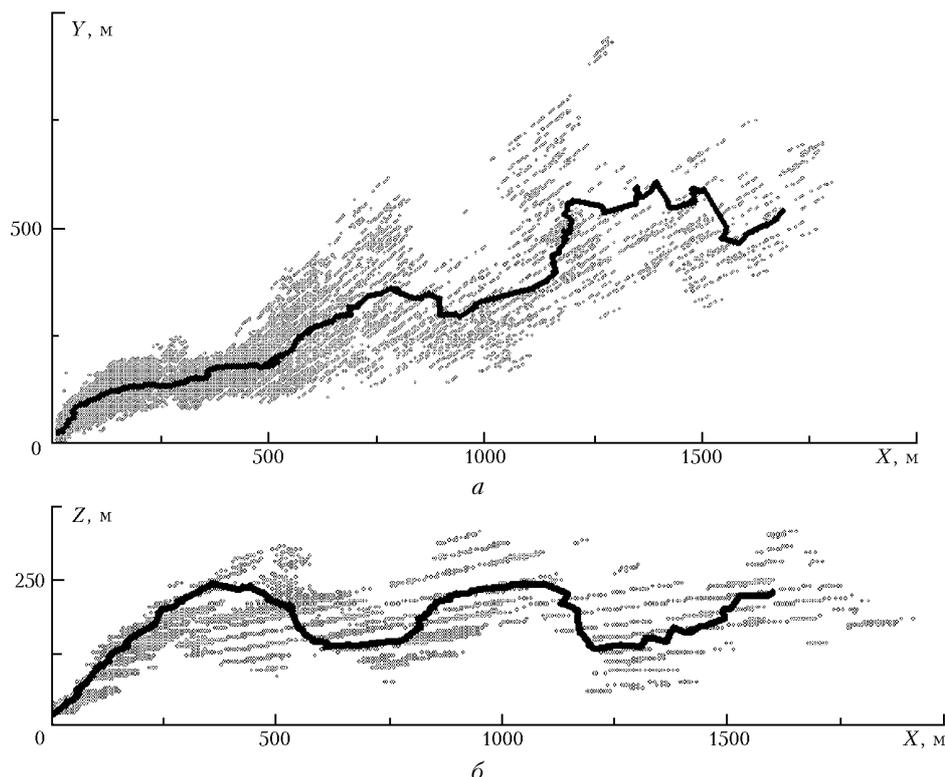


Рис. 2. Проекция всех точек зондирования в течение эксперимента на горизонтальную (а) и вертикальную (б) плоскости. Сплошная линия – траектория центра тяжести облака, рассчитанная по данным эксперимента

воздуха  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ , скорость ветра  $4\text{ м/с}$  на высоте  $2,5\text{ м}$ , скорость трения  $u_* = 0,2\text{ м/с}$ , масштаб Обухова  $L = -6,2\text{ м}$ . Для расчета лагранжевых времен корреляции компонент скорости вначале оценивалась высота слоя перемешивания по формуле  $H_m = Z_m 0,4 u_* / f_{\text{Cor}}$  [11], где  $f_{\text{Cor}}$  – параметр Кориолиса;  $Z_m$  – безразмерный коэффициент. Для летних условий и неустойчивой стратификации атмосферы  $Z_m = 0,7$  [11]. Затем вычислялся масштаб скорости в конвективных условиях  $w_* = u_* (2,5 H_m / |L|)^{1/3}$  и производился расчет дисперсии турбулентных пульсаций скорости. Расчет последних и лагранжевых времен корреляции компонент скорости в неустойчиво стратифицированном пограничном слое проводился по аппроксимационным формулам, приведенным в [7, гл. 4, 7]. Вычисленная таким образом средняя по слою смешения энергия турбулентных пульсаций  $1,5\text{ м}^2/\text{с}^2$  практически совпала с данными измерений на высоте  $2,5\text{ м}$ .

На рис. 3 приведены зависимости наблюдаемых безразмерных массы и радиуса облака от времени, рассчитанные по формулам (5), (7). Незвестная величина  $Q/c_{\text{min}}$  подбиралась из условия  $g = 0$  на предельной дальности зондирования, составляющей в данном эксперименте  $3\text{ км}$ . На такое расстояние от лидара облако удаляется приблизительно к  $400\text{-й с}$ . Дальнейшие расчеты проводились с величиной  $Q/c_{\text{min}}$ , найденной таким способом.

На рис. 4–6 приведены продольные, поперечные и вертикальные размеры облака, полученные в результате обработки лидарных данных и рассчитанные

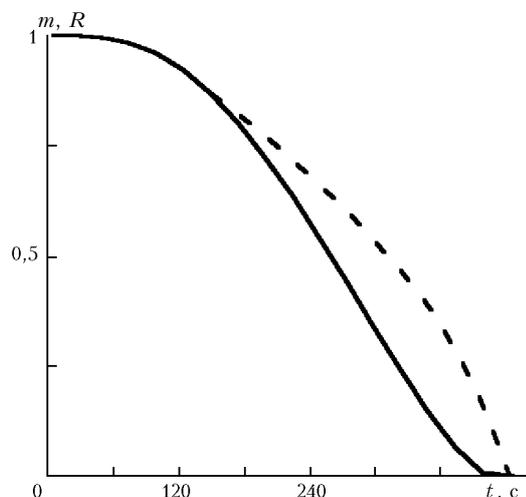


Рис. 3. Наблюдаемые безразмерные масса (сплошная линия) и размер облака (штриховая линия), рассчитанные соответственно по (5) и (7)

по формулам (5), (12). Гладкими кривыми представлен расчет. Нерегулярные кривые получены из экспериментальных данных описанным выше способом численного интегрирования при разных пространственных разбиениях. Относительно небольшие различия между экспериментальными кривыми свидетельствуют о достаточной точности интегрирования по пространству при вычислении размеров облака по опытным данным. Превышение экспериментально определенных поперечных размеров облака над рассчитанными (см. рис. 5) предположительно можно связать с

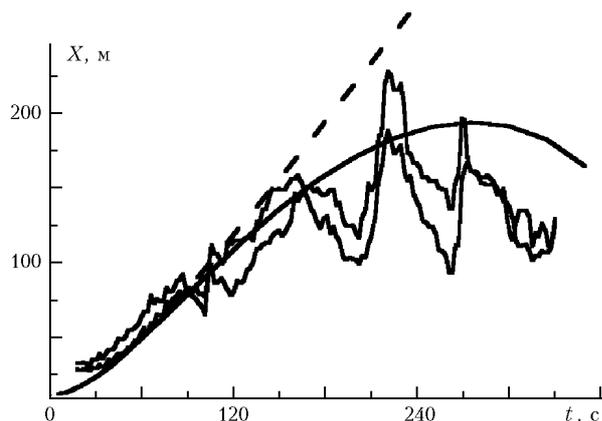


Рис. 4. Зависимость от времени продольного размера облака. Нерегулярные кривые – результат обработки эксперимента при разбиениях области интегрирования на 27 и 1000 частей. Штриховая линия – размер облака, рассчитанный по (2), сплошная – видимый размер облака, рассчитанный по (2), (7)

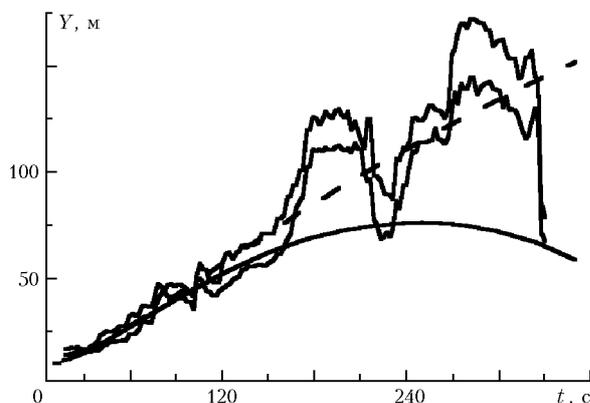


Рис. 5. Зависимость горизонтального размера облака в поперечном направлении вектора скорости ветра от времени. Нерегулярные кривые – результат обработки эксперимента при разбиениях области интегрирования на 27 и 1000 частей. Штриховая линия – размер облака, рассчитанный по (6), сплошная линия – видимый размер облака, рассчитанный по (5), (12)

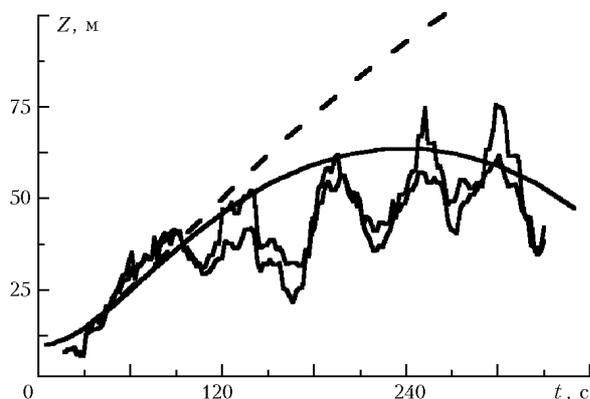


Рис. 6. Зависимость вертикального размера облака от времени. Нерегулярные кривые – результат обработки эксперимента при разбиениях области интегрирования на 27 и 1000 частей. Штриховая линия – размер облака, рассчитанный по (5), сплошная – видимый размер облака, рассчитанный по (5), (12)

флуктуациями направления ветра, приведшими к «размазанности» лидарных данных в поперечном направлении. В целом же результаты расчетов и эксперимента находятся в удовлетворительном согласии.

## Заключение

Проведенный эксперимент показал, что с помощью лидара можно оперативно, с высоким пространственным и временным разрешением контролировать распределение концентрации в импульсно образованном облаке примеси. Для надежного определения размеров облака и массы содержащейся в нем примеси нужно использовать экспериментальные данные, усредненные за время, превышающее время сканирования облака. Последнее должно быть много меньше характерного времени изменения размеров облака. Численное моделирование проводилось в рамках гауссовой статистической модели. Показана важность учета конечной чувствительности прибора при расчете наблюдаемых размеров и массы облака. Расчетные зависимости наблюдаемых размеров облака от времени удовлетворительно согласуются с данными эксперимента.

Авторы выражают благодарность сотрудникам группы акустического зондирования ИОА за предоставленные результаты измерений на ультразвуковой метеостанции.

Работа выполнена в рамках совместного гранта РФФИ № 00-05-81164 Бел2000а, БФФИ (Ф-99Р-126) и программы ЕС ИНКО Коперникус 2 (проект ИСИРЕММ, контракт ICA2-СТ-2000-10024).

1. *Мушенко П.М.* Экспериментальное исследование рассеяния примеси от мгновенных источников // Тр. ЛГМИ. 1963. Вып. 15. С. 153–160.
2. *Красновская Л.Н.* Некоторые характеристики горизонтальной турбулентной диффузии в атмосфере и их оценка по распространению примеси от мгновенных источников // Тр. ИЭМ. 1972. Вып. 27. С. 76–82.
3. *Gifford F.A.* Relative atmospheric diffusion of smoke puffs // J. Meteorol. 1957. V. 14. № 5. P. 410–414.
4. *Nicola P.V.* Measurement of movement, concentration and dimensions of clouds resulting from instantaneous point sources // J. Appl. Meteorol. 1971. V. 10. P. 962–973.
5. *Лазерный контроль атмосферы* / Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
6. *Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н.* Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 297 с.
7. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей* / Под ред. Ф.Т.М. Ньюистадта и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 384 с.
8. *Монин А. С., Яглом А. М.* Статистическая гидромеханика. М.: Наука. Ч. 2. 1967. 720 с.
9. *Новиков Е.А.* Метод случайных сил в теории турбулентности // Ж. эксперим. и теор. физ. 1963. Т. 44. № 6. С. 2159–2168.
10. *Йорданов Д.* О высоте приземного воздушного слоя //

- Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1977. Т. 13. № 7. С. 781–783.
11. *Атмосфера*: Справочник. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 509 с.
12. *Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В., Курков К.И., Цанев В.И.* Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1986. 188 с.
13. *Балин Ю.С., Разенков И.А.* Лазерный контроль аэрозольных загрязнений воздушного бассейна промышленных центров // *Оптика атмосфер. и океана*. 1993. Т. 6. № 2. С. 169–188.
14. *Бозушев А.Я.* Программное обеспечение ультразвуковых метеостанций для целей исследования атмосферной турбулентности // *Оптика атмосфер. и океана*. 1999. Т. 12. № 2. С. 176–180.

*Yu.S. Balin, A.D. Ershov, A.I. Bril, V.P. Kabashnikov, V.M. Popov, and A.P. Chaikovskii.* **Study of admixture propagation from a pulse source through the turbulent atmosphere.**

Based on field and numerical experiments, propagation of aerosol from a pulsed source have been studied. The field experiment was conducted in summer, in steppe, using the remote and local controlling instrumentation. A charge with an indicator substance, set off at the altitude of 10 m, served a source of the admixture. Tracking the cloud formed of the condensed-phase products of explosion was conducted with a scanning lidar. The ratio of the backscattering signal from the cloud to the signal from the background aerosol, as well as the time and coordinates of points of sensing were recorded. In 25–30 m from the explosion site, the ultrasonic meteorological station measured the air temperature, vertical and horizontal components of wind speed and its direction, total energy of turbulent movements, the level of tangential turbulent stress friction, and vertical turbulent flow of heat. The experimental lidar data were compared with results of numerical simulation of the admixture spatial distribution, using the statistic Gaussian distribution model. As a whole, the calculated results satisfactorily agree with the experiment.