

К.П. Куценогий¹, В.И. Макаров¹, Л.К. Трубина², А.М. Климашин²,
Д.Ю. Махов², М.В. Голобоков²

Определение геометрии дымового шлейфа от аэрозольного генератора методом цифровой стереофотограмметрии

¹ *Институт химической кинетики и горения СО РАН,*

² *Сибирская государственная геодезическая академия, г. Новосибирск*

Поступила в редакцию 2.09.2003 г.

Приводится краткий обзор экспериментальных и теоретических исследований по использованию методики дымовых струй для изучения параметров атмосферной диффузии газоаэрозольной примеси в пограничном слое атмосферы. Описан новый метод с использованием цифровой стереофотограмметрии, ГИС-технологий и аэрозольного генератора регулируемой дисперсности. Приведены результаты полевого эксперимента по измерению геометрии дымового шлейфа. Изложены теоретические основы определения геометрических размеров аэрозольного облака. Проведены оценки возможностей и точности определения координат исследуемого объекта предложенным методом.

Введение

Искусственные аэрозольные облака уже давно и широко применяются для изучения атмосферной диффузии в приземном и пограничном слоях атмосферы. Достаточно подробное изложение теоретических основ этого метода и практического использования полученных данных для обоснования различных моделей расчета загрязнения атмосферы газообразными и аэрозольными примесями можно найти в [3, 22, 28].

Для корректного сопоставления экспериментальных данных и теоретического описания поведения невесомой (газообразной) примеси в турбулентной атмосфере часто применяется методика дымовых струй. В ней модельное облако дыма формируется либо аэрозольным генератором термомоноконденсационного типа, либо пиротехническими дымовыми шашками, которыми создаются маскирующие дымы [6, 21]. Такие дымы образуют аэрозольные частицы субмикронного размера с малой скоростью седиментации, хорошо увлекаемые турбулентными пульсациями атмосферы. В большинстве опубликованных работ экспериментальная методика дымовых струй использовалась либо для проверки теоретических моделей, описывающих поведение эмиссии невесомой примеси из дымовых труб [1, 2, 14–16, 29–31], либо для получения эмпирических констант, входящих в статистические модели турбулентной диффузии в приземном и пограничном слоях атмосферы [5, 7–11, 17, 18, 23–25].

При этом большинство экспериментов с дымовыми струями, которые выполнены к настоящему времени, старались проводить в условиях, максимально приближенных к горизонтально однородной подстилающей поверхности в квазистационарной стратифицированной атмосфере и однородных гра-

ничных условиях, учитывающих взаимодействие диффундирующей примеси с подстилающей поверхностью.

В реальных природных ситуациях эти условия никогда не выполняются, поэтому при количественной интерпретации экспериментальных данных с помощью того или иного теоретического описания всегда оговаривается область применимости используемого приближения.

Из-за сложности, трудоемкости и дороговизны экспериментов в природных условиях многие из важных с научной и практической точек зрения вопросов о закономерностях турбулентной атмосферной диффузии примеси еще не решены. Прежде всего, это – диффузия тяжелой примеси, рассеяние примеси в нестационарно стратифицированной атмосфере, включая температурную и динамическую неоднородность, учет взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью. Каждый из перечисленных факторов имеет свои специфические особенности и требует специальных методик исследования. Подробно эти аспекты анализируются в [4, 5, 26].

Одним из методов обработки экспериментальных данных временного изменения геометрических размеров дымовой струи является стереофотограмметрический, который, наряду с определением диффузионных характеристик, позволяет также описать сложную траекторию поведения дымовой струи, связанную с более медленными изменениями скорости и направления ветра в приземном и пограничном слоях атмосферы [1, 12, 26]. Для этих целей приводятся результаты апробации наземной цифровой стереосъемки. К сожалению, пока реализовать комплексные исследования проблемы о рассеянии примеси в реальной атмосфере в едином эксперименте не удалось.

Методика проведения работ и результаты

В настоящем сообщении описывается методика экспериментальных исследований, которая позволяет преодолеть ряд принципиальных ограничений описанных ранее полевых опытов. Она является обобщением и развитием методик исследования поведения аэрозольного облака в приземном и пограничном слоях атмосферы с учетом взаимодействия частиц с растительностью и подстилающей поверхностью [19, 20, 26, 32, 33]. Не вдаваясь в детали предлагаемого подхода, укажем два наиболее существенных момента, которые оказывают огромное влияние на возможности корректного сопоставления теоретических и экспериментальных результатов.

Первый — это возможность моделирования в природных условиях различных свойств примеси одним и тем же источником в конкретных сценариях, а второй заключается в возможности фиксации динамики изучаемых процессов цифровыми камерами для дальнейшего анализа их траекторий по стереоизображениям.

В рамках существующих теоретических моделей можно показать, что коэффициент турбулентной диффузии газовой примеси в условиях приземного и пограничного слоев атмосферы близок к значению этого же параметра для частиц диаметром менее 200 мкм [19]. С другой стороны, теоретический анализ показывает, что при удалении от источника существенно различаются концентрации оседающей и неоседающей примеси как в ближней (максимум концентрации), так и в дальней зонах, в зависимости от характера взаимодействия с подстилающей поверхностью [4]. Мерой взаимодействия может служить отношение скорости сухого выпадения к скорости турбулентного трения, в значительной степени зависящее от характеристик растительного покрова подстилающей поверхности [4, 19, 20].

Поэтому для проведения экспериментов в полевых условиях желательно иметь мобильный источник дымовой струи с изменяемым размером частиц и возможностью изменения геометрии струи в горизонтальном и вертикальном направлениях. В выполненных экспериментах дымовое облако создавалось генератором аэрозолей регулируемой дисперсности (ГРД), который во многом удовлетворяет сформулированным выше требованиям [27]. Общий вид ГРД во время проведения опыта показан на рис. 1, а ниже приведены его технические характеристики.

1. Генератор смонтирован на автомобиле ЗИЛ-131 высокой проходимости.

2. Имеет два режима образования аэрозолей:

а) термоконденсационный, создающий частицы субмикронного размера ($d < 1$ мкм);

б) пневмомеханический, позволяющий получать частицы различного размера ($5 < d_m < 30$ мкм).

Возможно одновременное использование обоих режимов.

3. Создание источников различной геометрии: точечный, линейный, различной пространственной ориентации, импульсный, непрерывный, неподвижный, мобильный.

4. Изменение начальной температуры аэрозольного облака.

5. Изменение химического состава аэрозольных частиц, включая получение флуоресцирующих частиц различного размера, что позволяет использовать высокочувствительные методы их регистрации.

Использование ГРД позволяет реализовать в реальных полевых условиях весь комплекс экспериментальных методов исследования дымовых струй, разработанных к настоящему времени.

Существенное развитие методики полевых исследований состоит в применении цифровой фотограмметрической технологии, обеспечивающей изучение объектов по объемным моделям, формируемым по стереоскопическим парам их изображений.



Рис. 1. Пример цифрового снимка с изображением ГРД, дымовой струи и опорных точек

Процесс обработки изображений, выполняемый компьютерными средствами, состоит в формировании стереоскопического изображения и математической модели изучаемого объекта на основе реализации условий коллинеарности и компланарности проектирующих лучей [34–36]. Приведение модели к истинному масштабу и ее ориентирование относительно внешней системы координат выполняются по опорным точкам, пространственные координаты которых известны или измерены в выбранной для решения задачи системе координат. В результате получаем трехмерное метрическое изображение сфотографированного объекта, пространственные координаты точек которого могут быть определены с заданной дискретностью и зафиксированы в файлах в цифровом и графическом форматах.

Специфика изучаемого объекта обуславливает особенности выполнения конкретных технологических процессов. Так, при проведении стереосъемки для исследования динамики аэрозольных облаков, формируемых ГРД, существенным является обеспечение высокой степени синхронизации съемки двумя цифровыми камерами для достижения стереоскопического эффекта. Важным является выбор зон размещения опорных точек, который осложняется тем, что траектория распространения аэрозольного облака зависит от многих факторов и трудно прогнозируема.

Предлагаемая технология определения геометрии дымовых шлейфов включает следующие процессы:

1. Подготовительные работы (вычисление оптимальных параметров съемки).

2. Выбор положения и маркировка точек опорной сети с учетом размещения ГРД и розы ветров на момент съемки.

3. Геодезические работы по определению координат опорных точек.

4. Синхронная стереосъемка цифровыми камерами генерируемых аэрозольных облаков.

5. Цифровая обработка полученных стереопар: – внутреннее ориентирование левого и правого снимков;

– построение фотограмметрической модели по результатам измерения точек левого и правого изображений соответственно;

– внешнее ориентирование модели по измеренным координатам опорных точек;

– идентификация границ распространения аэрозольных облаков в стереоскопическом режиме (в итоге получим набор пространственных координат X, Y, Z).

6. Вычисление параметров, характеризующих динамику аэрозольного облака, и визуализация результатов.

На этапе подготовительных работ вычисляются оптимальные параметры съемки, обеспечивающие максимальную точность определения пространственных координат точек, определяющих конфигурацию сфотографированного облака. Для этих целей средствами MatLab написана программа моделирования процесса съемки при заданных условиях,

в частности учитываются характеристики съёмочной камеры и предполагаемые линейные размеры объекта съемки, в соответствии с которыми вычисляются расстояние до объекта съемки, базис фотографирования и другие необходимые параметры.

Значимым параметром, определяющим точность получения пространственных координат, является базис, пространственные значения которого определяются по формулам:

$$B_{X_{\max}} = \frac{m_x p^2}{x_{\max} m_p}, \quad B_{Y_{\max}} = \frac{m_y p^2}{f m_p}, \quad B_{Z_{\max}} = \frac{m_z p^2}{z_{\max} m_p},$$

где m_x, m_y, m_z – средние квадратические ошибки определения координат X, Y, Z ; x_{\max}, z_{\max} – максимальные размеры по координатам X, Z (определяются размерами кадра); p – среднее значение продольного параллакса, мм; m_p – среднеквадратическая ошибка определения продольного параллакса, мм; f – фокусное расстояние съёмочной камеры, мм.

За окончательное значение принимается среднее значение базиса B_s , удовлетворяющее точности определения всех трех координат.

Расстояние от съёмочных камер до средней плоскости объекта съемки Y_{\max} , при котором обеспечивается заданное перекрытие, определяется по формуле

$$Y_{\max} = \frac{f B_s}{l_x (1 - p_x)},$$

где l_x – максимальный линейный размер в плоскости изображения (размер кадра); p_x – заданное продольное перекрытие, %;

Протяженность объекта в средней плоскости в зоне продольного перекрытия

$$L_x = m p,$$

где m – масштаб снимков.

Максимально допустимая высота объекта в средней плоскости

$$L_{z_{\max}} = h_i + Y_{\max} \operatorname{tg}(b_z + w),$$

где h_i – высота установки камеры; w – поперечный угол наклона камеры; b_z – половина вертикального угла поля зрения.

На следующем этапе с учетом вычисленных параметров съемки и места расположения ГРД на местности выбирают опорные точки и выполняют их маркировку с помощью специально изготовленных изображений черных крестов на белом фоне, размер которых зависит от масштаба съемки. Точки выбирают на разном удалении от съёмочных камер таким образом, чтобы их изображения попали в зону перекрытия. Пространственные координаты замаркированных точек определяют геодезическим методом.

Синхронизация работы камер при съемке выполняется за счет управления работой цифровых камер непосредственно с компьютера, для чего изготовлено переходное устройство для одновременного

подключения камер с точностью синхронизации 0,002–0,004 с.

В процессе фотограмметрической обработки стереопар формируются файлы координат пространственных точек изучаемого объекта, которые могут экспортироваться в программные продукты, реализующие функции 3D-графики для визуализации результатов.

Апробация разработанной технологии проводилась в окрестностях Новосибирска на площадке, покрытой невысокой травой. Перед съемкой была разбита сеть маркированных опорных точек в условной системе координат (см. рис. 1, точки «а»).

Для фиксации динамики распространения генерируемого облака выполнена наземная съемка двумя синхронизированными цифровыми камерами Casio QV-3000EX. Съемочные камеры размещались таким образом, чтобы базис был параллелен направлению распространения аэрозольного облака. Параметры съемки приведены в таблице, а схема размещения оборудования при съемке показана на рис. 2.

| Параметр | Значение |
|---|----------|
| Расстояние до объекта, м | 70 |
| Базис, м | 16 |
| Масштаб съемки | 1:10000 |
| Размер пикселя в пространстве объекта, м | 0,033 |
| Количество опорных точек | 8 |
| Точность геодезических определений, мм | 1 |
| Априорная точность определения координат, м | 0,26 |

При проведении эксперимента было получено шесть стереопар с изображением аэрозольного облака, зафиксированного в разные моменты времени, интервал фотографирования между стереопарами составлял 2 с.

В процессе цифровой обработки по полученным стереопарам формировались фотограмметрические модели, по которым в стереоскопическом режиме измерялись координаты точек, соответствующих верхней и нижней кромкам дымового шлейфа,

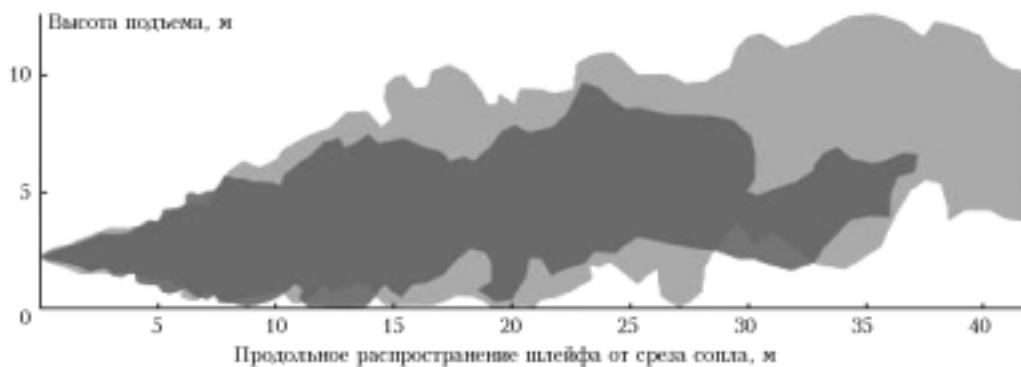


Рис. 3. Проекция аэрозольного облака на вертикальную плоскость

а также координаты набора точек непосредственно на изображении облака, характеризующих его пространственную конфигурацию в горизонтальном направлении [13].

В конечном итоге вычислены параметры, характеризующие форму струи в вертикальных и горизонтальных направлениях.

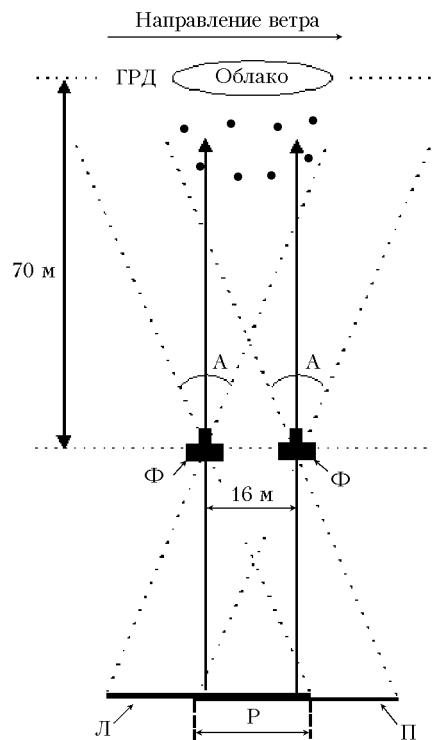


Рис. 2. Схема съемочного процесса и размещения аппаратуры: • – опорные точки; Л – левый снимок; П – правый снимок; Р – продольное перекрытие; А – угол зрения фотокамеры; Ф – цифровые фотокамеры

Проекция дымового шлейфа ГРД на вертикальную плоскость в два момента времени, полученные по изображениям на первой и второй стереопарах, представлены на рис. 3. Видно, что при выбранных условиях съемки максимальное расстояние от среза сопла, на котором измерены размеры аэрозольного облака, составило около 40 м.

Полученные результаты позволили проследить изменение формы струи в зависимости от расстояния от среза сопла (рис. 4). На графике каждая кривая характеризует форму дымового шлейфа, зафиксированную на одной из шести стереопар. Из графика видно, что на расстоянии до 10 м контур струи представляет собой практически прямолинейный отрезок, из чего можно сделать вывод, что на этом участке геометрию струи определяет скорость истечения струи из сопла. Данное заключение хорошо согласуется с теоретическими расчетами [37]. Для описания поведения аэрозольного облака на больших удалениях необходимо учитывать влияние атмосферной турбулентности.

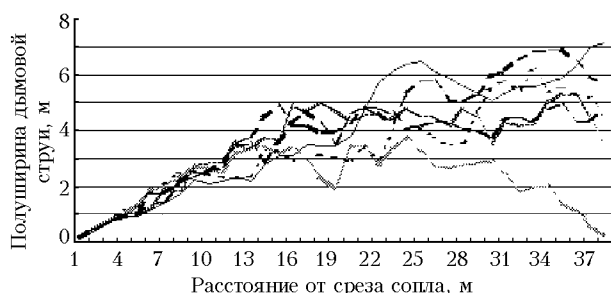


Рис. 4. График изменения формы струи: — ряд 1, — ряд 2, — ряд 3, — ряд 4

Пространственная модель облака восстановлена методом триангуляции Делоне средствами MatLab, один из возможных вариантов ее визуализации показан на рис. 5.

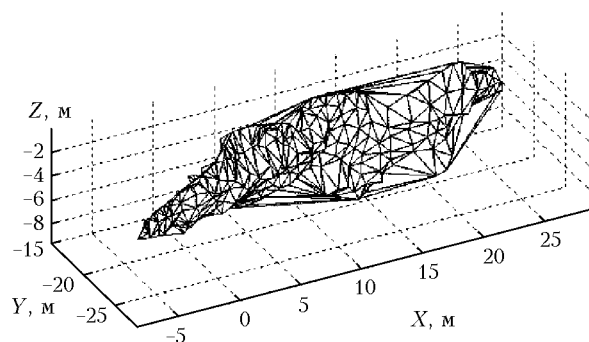


Рис. 5. Цифровая модель облака

Анализ полученных данных показал, что предложенная технология позволяет измерять временное изменение трехмерной геометрии аэрозольного облака. Поэтому в отличие от ранее известных методик применение цифровой стереосъемки открывает новые возможности для изучения рассеяния газоаэрозольных примесей в реальных условиях атмосферной турбулентности с учетом неоднородной подстилающей поверхности.

Выводы

1. Предложен новый метод изучения пространственно-временного изменения геометрии аэрозольного облака в трехмерном пространстве в природных условиях. Это позволяет исследовать поведе-

ние газоаэрозольных примесей в реальной турбулентной атмосфере с учетом динамической и термической неоднородности подстилающей поверхности.

2. Описаны методики проведения полевых экспериментов и обработки экспериментальных данных.

3. Приведены результаты натурных экспериментов и теоретические оценки возможностей и точности измерения геометрических размеров аэрозольного облака.

1. Бем Б. Результаты экспериментального исследования дымовых струй от тепловых электростанций // Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Л.: ГИМИЗ, 1971. С. 44–48.
2. Буров М.И., Елисеев В.С., Новаковский Б.А. Стереодиаграмметрический метод исследования атмосферной диффузии // Тр. ГГО. 1969. Вып. 238. С. 77–85.
3. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: ГИМИЗ, 1991. 278 с.
4. Бызова Н.Л., Куценогий К.П. Влияние структуры приземного слоя атмосферы и граничного условия на величину дозы и плотность отложенной аэрозольной примеси // Тр. ИЭМ. 1977. Вып. 15(60). С. 5–15.
5. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: ГИМИЗ, 1989. 263 с.
6. Вейцгер Ю.В., Лучинский Г.П. Маскирующие дымы. М.; Л.: Госхимиздат, 1947. 202 с.
7. Гаргер Е.К. О рассеянии дыма от высотного точечного источника // Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Л.: ГИМИЗ, 1971. С. 194–206.
8. Гаргер Е.К., Найденов А.В., Уваров Д.Б. Исследование относительной поперечной диффузии по дымовым струям в приземном слое атмосферы // Тр. ИЭМ. 1978. Вып. 21(80). С. 16–24.
9. Гаргер Е.К., Конарев В.Ф., Найденов А.В., Уваров Д.Б. Оценка возможности использования трассеров для проверки гипотезы подобия лагранжевой турбулентности в приземном слое атмосферы // Тр. ИЭМ. 1977. Вып. 15(60). С. 78–99.
10. Гаргер Е.К., Найденов А.В., Уваров Д.Б. О поперечной диффузии в приземном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1980. Т. 16. № 4. С. 368–375.
11. Гаргер Е.К. Экспериментальная оценка некоторых констант гипотезы подобия лагранжевых характеристик турбулентности в приземном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1982. Т. 18. № 8. С. 787–796.
12. Гаргер Е.К., Леманн А. О сравнении ветровых и турбулентных профилей по измерениям с помощью вертикальных дымовых полос и высотной метеомачты // Тр. ИЭМ. 1977. Вып. 15(60). С. 59–77.
13. Гук А.П., Белошапкин М.А., Коркин В.С., Самушкин В.А. Цифровой фотограмметрический комплекс для создания и обновления карт // Геод. и картогр. 1996. № 12. С. 39–48.
14. Елисеев В.С. Траектории дымовых струй от промышленного источника // Тр. ГГО. 1976. Вып. 373. С. 78–85.
15. Елисеев В.С. К вопросу о фотографировании дымовых струй от промышленных источников // Тр. ГГО. 1969. Вып. 238. С. 85–95.
16. Елисеев В.С. Стереодиаграмметрическое исследование воздушного потока в пограничном слое над холмом // Тр. ГГО. 1971. Вып. 254. С. 87–99.

17. Жуков Г.П. Об измерении концентрации аэрозоля с помощью макета малобазового фотометра // Тр. ИЭМ. 1977. Вып. 15(60). С. 119–132.
18. Казанский А.Б., Монин А.С. О форме дымовых струй // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1957. № 8. С. 1020–1033.
19. Куценогий К.П. Экспериментальные и теоретические исследования распространения и осаждения аэрозолей в турбулентном потоке: Дис. ... докт. наук. Новосибирск, 1983. 480 с.
20. Куценогий К.П. Экспериментальное и теоретическое исследование распространения и осаждения аэрозолей на растительность и почву // Поведение пестицидов и химикатов в окружающей среде: Тр. Советско-американского симпозиума. Айова-Сити, США, октябрь 1987 г. Л.: ГИМИЗ, 1991. С. 53–71.
21. Лемани А. К определению параметров диффузии для различных пунктов // Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Л.: ГИМИЗ, 1971. С. 98.
22. Метеорология и атомная энергия. Л.: ГИМИЗ, 1971. 648 с.
23. Монин А.С. Распространение дыма в приземном слое атмосферы // Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962. С. 366–381.
24. Найденов А.В. О флуктуациях интегральной концентрации в дымовых струях в приземном слое атмосферы // Тр. ИЭМ. Вып. 21(80). 1978. С. 25–31.
25. Найденов А.В. Флуктуации интегральной концентрации в струе примеси от точечного наземного источника // Тр. ИЭМ. 1984. Вып. 29(103). С. 88–96.
26. Сахаров В.М., Куценогий К.П., Загуляев Г.Н., Павлов И.П., Гончаров А.П. Возможности мощного аэрозольного генератора при исследовании распространения примеси // Тр. ИЭМ. 1972. Вып. 27. С. 104–110.
27. Сахаров В.М. Конструктивные и режимные характеристики аэрозольного генератора с регулируемой дисперсностью // Оптимизация технологии применения инсектицидных аэрозолей. Новосибирск: СО ВАСХНИЛ, 1983. С. 3–13.
28. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: ГИМИЗ, 1975. 448 с.
29. Елисеев В.С. К вопросу о горизонтальном рассеянии примеси в атмосфере // Тр. ГГО. 1965. Вып. 172. С. 174–175.
30. Елисеев В.С. Определение параметров атмосферной диффузии по видимым очертаниям дымового облака // Тр. ГГО. 1966. Вып. 183. С. 77–78.
31. Елисеев В.С. Исследование структуры дымовой струи и определение коэффициента турбулентного перемешивания по вертикальному распределению концентраций // Тр. ГГО. 1968. Вып. 234. С. 95–99.
32. Куценогий К.П., Макаров В.И., Самсонов Ю.Н., Киров Е.И., Гук А.П., Трубина Л.К., Черемухин А.В. Экспериментальное исследование поведения аэрозольного облака в условиях динамической неоднородности // Тр. Междунар. конф. RDAMA-2001. Спецвыпуск. 2001. Т. 6. Ч. 2. С. 255–260.
33. Трубина Л.К., Куценогий К.П. Использование цифровой стереофотограмметрии и ГИС-технологий для описания динамической неоднородности подстилающей поверхности // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 511–514.
34. Трубина Л.К. Цифровая фотограмметрическая обработка снимков для получения геопространственных данных при оценке состояния экосистем: Дис. ... докт. техн. наук. Новосибирск, 2002. 189 с.
35. Лобанов А.Н. Фотограмметрия. М.: Недра, 1984. 550 с.
36. Дубиновский В.Б. Калибровка снимков. М.: Недра, 1982. 372 с.
37. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960. 612 с.

K.P. Koutsenogii, V.I. Makarov, L.K. Trubina, A.M. Klimashin, D.Yu. Makhov, M.V. Golobokov.
The digital stereophotogrammetry to measure the 3D geometry of aerosol plume formed by the mobile aerosol generator.

The current state of the experimental and theoretical research into the gas and aerosol diffusion in the atmospheric boundary layer using the smoke plume method is reviewed. The new method using the digital stereophotogrammetry, GIS technology and mobile aerosol generator with the regulate particle size distribution is described. The field experiment data and results of theoretical analysis are presented. Theoretical grounds for determining the dimensions of an aerosol cloud are described. The capabilities and accuracy of the proposed method are estimated as applied to finding the coordinates of a studies object.