

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ МАССОЙ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ, ИЗМЕРЕННОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И ПО МЕТОДУ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРАСТА

**С. П. Пронин, Е. С. Кононова, С. В. Кононов, В. С. Артамонов,
А. О. Люцигер, К. О. Шутова**

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова
Алтайский краевой центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
г. Барнаул

Системам экологического мониторинга атмосферного воздуха уделяется большое внимание, потому что они являются надежными помощниками в решении природоохранных задач. Например, в Москве в настоящее время работают 45 автоматических станций контроля загрязнения атмосферного воздуха [1]. Часть из них установлены на жилых территориях, а часть – вблизи автотрасс. Из-за возрастающего количества автотранспорта актуальной становится задача контроля взвешенных частиц непосредственно на улицах и уличных перекрестках городов. Передвижные экологические лаборатории являются важным элементом в системе обеспечения экологии горожан, но они не в состоянии обеспечить суточный мониторинг загрязнения атмосферы. Слишком много потребуется средств на их создание и содержание.

Классифицируют два основных метода контроля количества аэрозолей. Это методы, основанные на предварительном осаждении частиц пыли сажи и методы без предварительного осаждения.

На сегодняшний день основным методом контроля загрязнения атмосферного воздуха взвешенными частицами является метод осаждения частиц на специальном фильтре. Этот метод часто называют гравиметрическим. В руководящем документе [7] заданы методы контроля и определены программы наблюдения за качеством атмосферного воздуха: полная и неполная. Неполная программа проводится с целью получения информации о разовых концентрациях ежедневно в 7, 13, 19 час. Очевидно, что разовые концентрации пыли и сажи объективно отражают качество атмосферного воздуха в заданные часы. Чего не скажешь о среднесуточной концентрации. Например, пики транспортных потоков приходятся на время 9-10 утра и 17-18 вечера, поэтому загрязнения от

автотранспорта оказываются не полностью учтенными. Полная программа наблюдений предназначена для получения информации о разовых и среднесуточных концентрациях. Наблюдения по полной программе выполняются ежедневно путем непрерывной регистрации с помощью автоматических устройств или дискретно через равные промежутки времени не менее четырех раз при обязательном отборе в 1, 7, 13, 19 час. по местному декретному времени. Постоянный мониторинг в режиме реального времени (24 часа в сутки) на сегодняшний день не является отработанной технологией в виду больших затрат. Реализация этой программы требует осмысления многих вопросов. В частности, методов и средств измерений и контроля, которые должны быть надежными, точными, способными работать в режиме реального времени, быть не дорогими и исключающими избыточную информацию.

Работа в этом направлении уже ведется. Так, например, в плане развития системы атмосферного мониторинга в Мехико на 2012 год и в принятой программе конкретных действий Департамента по Окружающей Среде Федерального Округа (ДОСФО) [6] предусмотрены 7 пунктов по улучшению работы сети, один из которых – внедрение в систему мониторинга видеокамер для определения в режиме реального времени параметра “видимости”.

Поскольку взвешенные частицы изменяют оптические свойства исследуемого объема атмосферного воздуха, то для контроля его качества уже применяют оптически методы и средства. Например, спутниковые исследования аэрозолей по изменению ее оптической плотности [2]. Лидарное зондирование атмосферы и контроль ее качества по изменению коэффициента ослабления лазерного излучения, который коррелирует с аэрозольной плотностью атмосферы [3]. Ме-

тод и средство, включенный в план развития системы атмосферного мониторинга в Мехико отличается от известных. Поскольку метод можно реализовать на существующих системах видеонаблюдения, то он является перспективным.

Однако важно подчеркнуть, что какими бы методами и средствами не измеряли оптические параметры атмосферы необходимо связать их с предельно допустимой концентрацией (ПДК) взвешенных частиц. Параметр «видимости» специалистов может не устроить.

На кафедре информационных технологий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова на протяжении ряда лет выполнялись лабораторные исследования по изменению оптического контраста в изображении тест-объекта в виде парных штрихов с помощью видеокамеры в зависимости от концентрации дыма в экспериментальной камере [5,6]. В результате была получена теоретическая зависимость, которая определяет аэрозольную плотность атмосферы от изменения оптического контраста.

В 2011 году между Алтайским государственным техническим университетом им. И.И. Ползунова и государственным учреждением «Алтайский краевой центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» был заключен договор о сотрудничестве в области контроля загрязнения атмосферы по взвешенным частицам и саже в районе пр.Ленина, ул.Профинтерна и ул. Калинина в г. Барнауле.

Данные, получаемые ежедневно в государственном учреждении «Алтайский краевой центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», могут служить эталоном определения массовой концентрации пыли и сажи в атмосферном воздухе

Цель научно-исследовательской работы состояла в совместном исследовании корреляционной зависимости между массой взвешенных частиц пыли в атмосферном воздухе, измеренной гравиметрическим методом и по методу оптического контраста в изображении тест-объекта в виде парных штрихов.

Теоретический аспект метода измерения массовой концентрации пыли в атмосферном воздухе по оптическому контрасту.

Под концентрацией понимают отношение количества вещества к объему системы. Если в исследуемом атмосферном объеме $V_{атм}$ содержится N частиц, каждая из которых

имеет массу $m_{част}$, то массовая концентрация аэрозоля будет равна:

$$C = N \cdot m_{част} / V_{атм} = m_{аэп} / V_{атм}, \quad (1)$$

где C – концентрация аэрозоля; $m_{аэп}$ – масса аэрозоля.

Формула (1) равносильна определению плотности, поэтому справедливо и другое ее определение – аэрозольная плотность атмосферы $\rho_{атм}$ [3]:

$$\rho_{атм} = m_{аэп} / V_{атм}. \quad (2)$$

Единицы измерения аэрозольной плотности атмосферы – миллиграмм в единице объема воздуха: $мг/м^3$. В промышленной гигиене, в нормах на предельно допустимые концентрации (ПДК) веществ в аэрозольном состоянии в воздухе используется такая же весовая концентрация аэрозолей.

Световой поток Φ_0 , проходящий через поглощающую среду, уменьшается по закону:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-a_n \cdot x) = \Phi_0 \exp(-2,303 \cdot a_d \cdot x) = \Phi_0 \exp(-2,303 \cdot D), \quad (3)$$

где Φ_0 – падающий световой поток на вещество; Φ – прошедший световой поток через вещество толщиной x ; a_n – натуральный показатель поглощения; a_d – десятичный показатель поглощения; D – оптическая плотность вещества.

Очевидно, что изменение концентрации аэрозоля влечет за собой изменение оптической плотности, поэтому для оценки изменений используют понятие оптической плотности аэрозоля [2, 9].

Итак, говоря о содержании аэрозолей в воздухе, используют три понятия: ПДК взвешенных частиц, оптическую плотность аэрозоля и аэрозольную плотность атмосферы. Интуитивно понятно, что все они взаимосвязаны между собой, но в общем случае не равнозначны. Согласно закону Бера показатель поглощения a_n равен произведению удельного показателя поглощения χ на концентрацию вещества [8]:

$$a_n = \chi \cdot C. \quad (4)$$

Показатели степеней в уравнении (3) и значения величин в формулах (2), (4) можно записать в следующую цепочку равенств:

$$2,303 \cdot D = a_n \cdot x = \chi \cdot m_{аэп} \cdot x / V_{атм} = \chi \cdot m_{аэп} \cdot \rho_{атм}. \quad (5)$$

Оптическая плотность атмосферы является безразмерной величиной. Аэрозольная плотность атмосферы по размерности совпадает с размерностью ПДК, поэтому понятие аэрозольной плотности атмосферы предпоч-

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ МАССОЙ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ, ИЗМЕРЕННОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И ПО МЕТОДУ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРАСТА

тительнее оптической плотности атмосферы. Численное значение аэрозольной плотности атмосферы может быть меньше ПДК, равно или выше ПДК, т.е. равенство $\rho_{\text{атм}} = \text{ПДК}$ является критерием качества атмосферного воздуха при контроле оптическими средствами. Можно оперировать и величиной оптической плотности, но тогда потребуется выполнить вычислительную операцию:

$$D = \chi \cdot \rho_{\text{атм}} \cdot x / 2,303$$

Метрологический аспект в этом случае полностью выполняется, но насколько специалистам будет понятен, например, термин "ПДК по оптической плотности" – неизвестно. Вполне возможно, что потребуется не один год, чтобы этот термин широко внедрился и был понятен специалистам многих профилей.

Техническая реализация мониторинга атмосферного воздуха может быть осуществлена стандартными методами и средствами, которые используются при определении метеорологической оптической дальности видимости ФИ-2, ФИ-3 [10]. Принцип действия этих приборов основан на измерении степени ослабления интенсивности световых импульсов после прохождения через слой атмосферы, ограниченный длиной базисной линии прибора.

Поскольку атмосфера не только поглощает, но и рассеивает световой поток, то в формуле (3) вместо показателя поглощения используют показатель ослабления σ [8]:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-\sigma \cdot x). \quad (6)$$

Из формулы (6) несложно выразить показатель ослабления:

$$\sigma = \ln(\Phi_0 / \Phi) / x. \quad (7)$$

По аналогии с формулой (4) введем удельный показатель ослабления взвешенных частиц в атмосфере:

$$\sigma = \chi_{\sigma} \cdot \rho_{\text{атм}}. \quad (8)$$

Тогда метод измерения аэрозольной плотности атмосферы можно выразить формулой:

$$\rho_{\text{атм}} = \frac{1}{\chi_{\sigma} \cdot x} \ln\left(\frac{\Phi_0}{\Phi}\right). \quad (9)$$

Известно, что показатель ослабления σ можно также определить по контрасту в изображении тест-объекта [6]:

$$\sigma = \ln(K_0 / K) / x, \quad (10)$$

где K_0 , K – начальный и текущий контрасты соответственно. Под начальным контрастом понимается контраст в изображении тест-объекта при условии "чистой" атмосферы.

Для определения контраста используют тест-объект в виде нескольких пар светлых штрихов на светлом фоне, а сам контраст вычисляют по формуле:

$$K = \frac{S_{\text{max}} - S_{\text{min}}}{S_{\text{max}} + S_{\text{min}}}, \quad (11)$$

где S_{max} – освещенность в изображении светлых штрихов; S_{min} – освещенность в темном промежутке между штрихами.

Таким образом, оптический метод определения аэрозольной плотности атмосферы можно выразить в виде формулы:

$$\rho_{\text{атм}} = \frac{1}{\chi_{\sigma} \cdot x} \ln(K_0 / K). \quad (12)$$

Эта формула является теоретической базой для косвенного измерения массовой концентрации пыли в атмосферном воздухе. Логарифм контрастов является безразмерной величиной. Величина x представляет расстояние от тест-объекта до фотоприемника, поэтому ее размерность соответствует единицам длины (м). Поскольку $\rho_{\text{атм}}$ имеет размерность мг/м³, то несложно выразить единицы измерения удельного показателя ослабления χ_{σ} : $[\chi_{\sigma}] = \text{м}^2 / \text{мг}$.

Гравиметрический метод измерения массовой концентрации пыли.

Метод основан на определении массы взвешенных частиц пыли, задержанных фильтром из ткани ФПП при прохождении через него определенного объема воздуха [7].

Для определения разовой концентрации отбор производится в течение 20 мин. Предельная пылеемкость фильтра из ткани ФПП составляет 5 мг/см². Фильтр с отобранной пробой вынимают из фильтродержателя, складывают пополам запыленной поверхностью внутрь и помещают последовательно в пакет из кальки и в полиэтиленовый пакет. На пакет шариковой ручкой наносят следующие данные: дату и время отбора; начальное и конечное показания газового счетчика; температуру воздуха, проходящего через счетчик или ротаметр, и атмосферное давление во время отбора пробы. После этого фильтр передается в лабораторию для определения массы пыли. Перед взвешиванием фильтры не менее часа выдерживают в помещении, где производится взвешивание. Если отбор пробы проводился при относительной влажности воздуха, близкой к 100 %, то фильтр доводят до постоянной массы. Взвешенные фильтры с накопленной на них пылью вкладывают в те же пакеты из кальки и полиэтилена, на которые шариковой ручкой наносят

значение конечной массы фильтра с пылью. Массовую концентрацию (ρ мг/м³) взвешенных частиц в воздухе вычисляют по формуле:

$$\rho = (m_2 - m_1)/V_0,$$

где m_1 - масса фильтра без пыли, мг; m_2 - масса фильтра с пылью, мг; V_0 - объем пропущенного через фильтр воздуха, приведенный к нормальным условиям.

Измерения проводились по неполной программе в 7, 13 и 19 час.

Расположение технических средств проведения эксперимента.

Эксперименты выполняли на пересечении пр. Ленина – ул. Профинтерна и пересечении ул. Профинтерна – ул. Калинина. Места проведения сбора данных отмечены на рисунке 1. В точке под номером 1 указано расположение поста ГУ «Алтайский ЦГМС». На рисунке 2 представлен пост с закрепленным на стене тест-объектом. В точке под номером 2 находился оператор с цифровой видеокамерой SAMSUNG HMX-Q10BP – 2. Оператор в ручном режиме производил запись кадров тест-объекта в количестве 30 штук в 13 и 19 час.

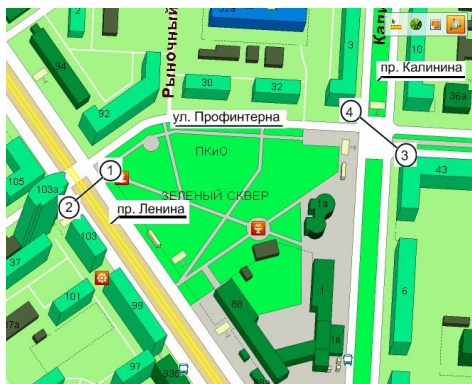


Рисунок 1 – Географическое расположение средств проведения эксперимента: 1 – пост ГУ «Алтайский ЦГМС», на стене которого закреплен первый тест-объект; 2 – цифровая видеокамера SAMSUNG HMX-Q10BP – 2; 3 – сетевая купольная видеокамера AXIS 233D; 4 – второй тест-объект.

Расположение второй цифровой видеокамеры показано на рисунке 1 под номером 3, а расположение тест-объекта под номером 4. В качестве камеры использовалась сетевая купольная видеокамера AXIS 233D. Измерения производились два раза в день в 13 и 19 час. С персонального компьютера через волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС) посредством протокола Ethernet через Web-браузер осуществляли соединение с видео-

камерой, настраивали ее положение для проведения эксперимента и сохраняли в памяти камеры. После чего перед измерением выставляли камеру в исходное положение и производили запись 20 кадров тест-объекта. На рисунке 3 представлен кадр с изображением пешеходного тротуара, на котором расположен тест-объект.



Рисунок 2 – Пост ГУ «Алтайский ЦГМС» с закрепленным на стене тест-объектом



Рисунок 3 – Тест-объект, рисованный на асфальте

Исследование изменений оптического контраста от концентрации пыли.

Из общего вида фотографий вырезали изображения тест-объектов (см. рисунок 4) и с помощью разработанной программы «Анализатор» производили считывание оптических сигналов в цифровом виде: максимальных значений $S_{\max}$ и минимальных – $S_{\min}$ (см. рисунок 5).

Зная максимальные и минимальные значения сигналов по каждому изображению, рассчитывали контраст по формуле (11).

На рисунке 6 в графическом виде представлен результат, выполненный с помощью видеокамеры SAMSUNG HMX-Q10BP. На графике отражена зависимость контраста от массовой концентрации пыли с линией тренда. Как видно из графика, зависимость между рассматриваемыми физическими величинами

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ МАССОЙ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ, ИЗМЕРЕННОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И ПО МЕТОДУ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРАСТА

очень слабая, коэффициент корреляции составляет всего $R=0,18$. На графике, который получен с помощью электронной таблицы Excel, приведен коэффициент детерминации. Коэффициент корреляции равен корню квадратному из коэффициента детерминации [11].

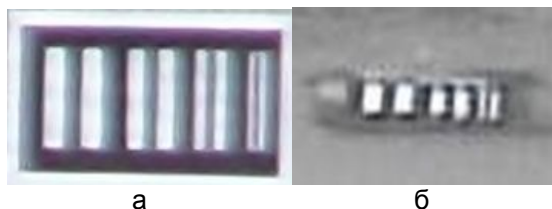


Рисунок 4—Изображения тест-объектов, полученные: а – с помощью SAMSUNG HMX-Q10BP; б – с помощью купольной видеокамеры AXIS 233D

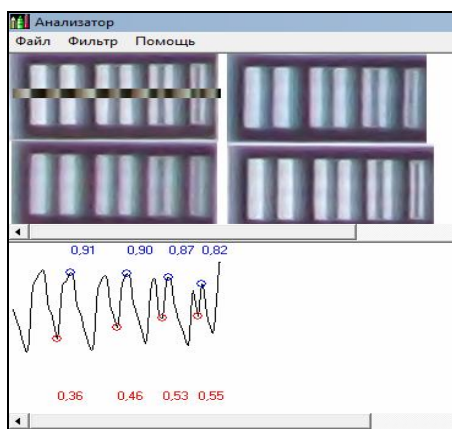


Рисунок 5 – Интерфейсное окно программы «Анализатор»

Кроме того, из графика следует вывод, что с увеличением массовой концентрации пыли контраст увеличивается, то есть с повышением концентрации пыли между тест-объектом и видеокамерой улучшается изображение тест-объекта, что явно противоречит физическому представлению процесса изменения контраста в изображении.

Таким образом, цифровая видеокамера SAMSUNG HMX-Q10BP при различных погодных условиях не способна отражать изменение контраста, коррелированных с массовой концентрацией пыли. Причина заключается в том, что с изменением освещенности тест-объекта видеокамера изменяет время экспозиции сигнала. С точки зрения визуального наблюдения изображение получается качественным, одинаковой яркости на жидкокристаллическом дисплее видеокамеры и при солнце, и при отсутствии солнца, но при

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №1 2011

этом изменяются соотношения максимального и минимального значений оптического сигнала, что отражается на контрасте. Уменьшение освещенности возможно как при изменении естественного освещения, так и при изменении массовой концентрации пыли. Следовательно, при одном уравнении (12) имеем два неизвестных.

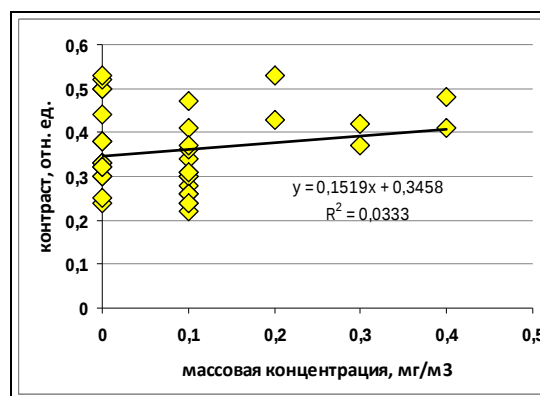


Рисунок 6 – Зависимость контраста от массовой концентрации пыли

В дальнейшем анализе данных был выделен диапазон контраста и пыли при отсутствии солнца, т.е. в пасмурную погоду. Для заданной концентрации пыли проводили усреднение значений оптического контраста, вычисляли среднее квадратическое отклонение и доверительный интервал.

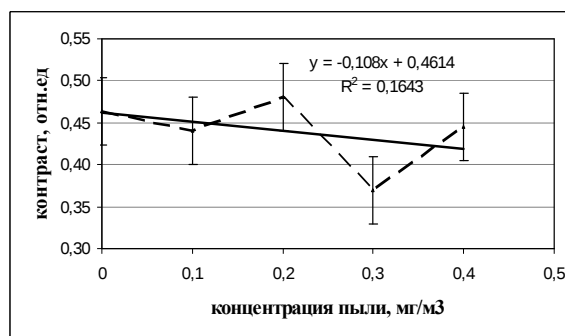


Рисунок 7 – Зависимость контраста от массовой концентрации пыли в пасмурную погоду

На рисунке 7 в виде графика приведен результат вычислений. Из графика следует вывод, что тенденция изменения контраста соответствует физическим представлениям. Контраст уменьшается с увеличением массовой концентрации пыли. При этом увеличился коэффициент корреляции, $R=0,41$. Отри-

цательным моментом в полученном результате является скачкообразное изменение контраста от концентрации пыли. Поскольку от концентрации пыли также изменяется освещенность, а значит и контраст, то были проведены дополнительные исследования по работе цифровой видеокамеры.

Исследование изменений контраста при изменении освещенности тест-объекта у цифровой видеокамеры SAMSUNG HMX-Q10BP и специализированной видеокамеры «Видеоскан» в лабораторных условиях.

Отличительные особенности видеокамер состоят в том, что у специализированной видеокамеры «Видеоскан» нет автоматической подстройки времени экспозиции, его задают. В эксперименте время экспозиции составляло 40 мс.

Эксперимент состоял в следующем. Перед двумя видеокамерами устанавливали один тест-объект с парными штрихами и освещали его источником света с регулируемой мощностью. Увеличивая мощность источника освещения одновременно фиксировали изображения двумя видеокамерами.

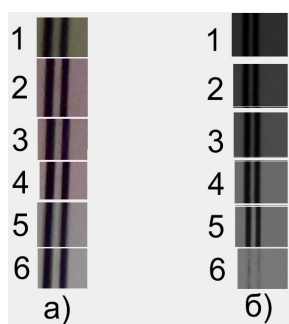


Рисунок 8 – Изображения парных штрихов, полученных с помощью: а) - цифровой видеокамеры SAMSUNG HMX-Q10BP; б) – специализированной видеокамеры «Видеоскан».

Цифрами обозначен процесс увеличения освещенности на тест-объекте

Изображения парных штрихов представлены на рисунке 8. На изображениях отчетливо видно, что с увеличением освещенности на тест-объекте, яркость изображения штрихов, полученных с помощью цифровой видеокамеры SAMSUNG, меняется незначительно. Зато на изображениях штрихов, полученных с помощью специализированной видеокамеры «Видеоскан», яркость изображения увеличивается с увеличением освещенности. Такой эффект вполне объясним. В процессе увеличения освещенности тест-

объекта видеокамера SAMSUNG автоматически изменяет время экспозиции сигнала. У видеокамеры «Видеоскан» время экспозиции в процессе эксперимента оставалось неизменным, поэтому на рисунке 1,б под номером 6 заметен эффект растекания заряда, когда фон и штрихи начинают сливаться.

На основе экспериментальных данных построен график зависимости изменения контраста в изображении тест-объекта от его освещенности. График представлен на рисунке 9.

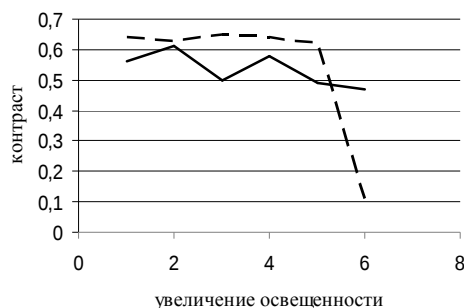


Рисунок 9 – Изменение контраста в изображениях штрихов тест-объекта при увеличении освещенности, полученных с помощью видеокамеры SAMSUNG – сплошная линия и с помощью видеокамеры «Видеоскан» – пунктирная линия

Из графика видно, что с увеличением освещенности контраст в изображении штрихов, полученных с помощью «Видеоскан», остается практически неизменным. Зато контраст на изображениях видеокамеры SAMSUNG скачкообразно изменяется.

Таким образом, если среда не меняет своих свойств, то профессиональная видеокамера при изменении освещенности контраст не изменяет. Чего не скажешь о видеокамере SAMSUNG. Следовательно, на изменение контраста будут влиять как погодные условия (солнечный день, или пасмурный), так и изменения концентрации взвешенных частиц в атмосфере. Увеличение концентрации уменьшает освещенность, а значит, влияет и на контраст в изображении тест-объекта. Эту неоднозначность можно устранить путем введения поправки в виде корректирующих коэффициентов.

С возрастанием концентрации взвешенных частиц освещенность падает, поэтому у графика на рис.2 перевернем ось освещенности на 180°, как показано на рис.10.

Как видно из рис.9, у специализированной камеры изменение контраста представ-

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ МАССОЙ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ, ИЗМЕРЕННОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И ПО МЕТОДУ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРАСТА

ляет линию близкую к прямой. Следовательно, необходимо и для графика изменения контраста видеокамеры SAMSUNG тоже получить прямую линию. В таблице 1 приведены в первой колонке максимальное значение сигнала $S_{\max}$, во второй колонке – минимальное $S_{\min}$, в третьей колонке контраст в изображении парных штрихов. Примем за условную единицу значение контраста 0,47. Тогда все остальные значения корректирующих коэффициентов будут получаться путем деления 0,47 на остальные экспериментальные контрасты. Они рассчитаны и приведены в четвертой колонке.

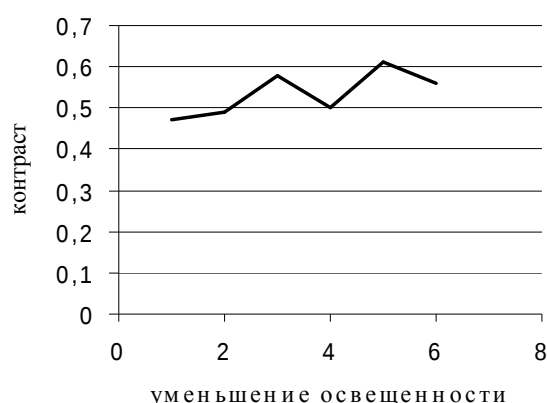


Рисунок 10 – Изменение контраста в изображениях штрихов тест-объекта при уменьшении освещенности, полученных с помощью видеокамеры SAMSUNG – сплошная линия и с помощью видеокамеры «Видеоскан» – пунктирная линия

Таблица 1 – Значения корректирующих коэффициентов для видеокамеры SAMSUNG

$S_{\max}$	$S_{\min}$	K	Корр. Коэфф.
42	0,12	0,56	0,84
0,5	0,12	0,61	0,77
0,51	0,17	0,50	0,94
0,56	0,15	0,58	0,81
0,55	0,19	0,49	0,96
0,58	0,21	0,47	1,00

В таблице 2 представлены итоговые экспериментальные данные: массовая концентрация пыли, измеренный экспериментальный контраст K, корректирующие коэффициенты и скорректированный контраст $K_{\text{кор}}$.

Таблица 2 – Итоговые экспериментальные данные

Концент-рация пыли, мг/м ³	Конт-раст, K	Коррек. коэфф.	Скоррек. контраст $K_{\text{кор}}$
0,0	0,46	1,00	0,464
0,1	0,44	0,96	0,42
0,2	0,48	0,81	0,39
0,3	0,37	0,94	0,35
0,4	0,43	0,77	0,33

По данным таблицы 2 на рисунке 11 построен экспериментальный график изменения контраста (пунктирная линия) и график скорректированного контраста (сплошная линия). По скорректированным точкам в программе Excel была задана линия тренда в виде экспоненты. В результате получен коэффициент корреляции, $R = 0,995$ (см. график). Коэффициент корреляции оказался очень высоким. Таким образом, контраст в изображении парных штрихов изменяется от концентрации пыли по экспоненциальному закону. Данный результат хорошо согласуется с формулой Бугера-Ламберта-Бера (3) и результатами эксперимента, полученными в лабораторных условиях с помощью цифровой видеокамеры «Видеоскан» и прибора РДВ-3 [5].

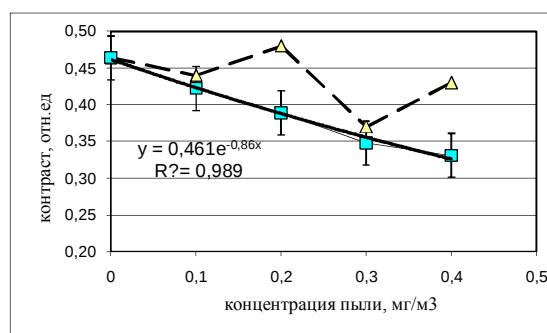


Рисунок 11 – Графики изменения контраста в зависимости от массовой концентрации пыли: пунктирная линия – нескорректированный контраст; сплошная линия – скорректированный контраст

Зная контраст K, по формуле (12) можно рассчитать массовую концентрацию пыли. Очевидно, что K_0 – это контраст при чистом без пыли атмосферном воздухе. Однако, не-

обходимо учитывать свойства цифровой видеокамеры. Поскольку ее объектив вносит искажения, характеризуемые функцией рассеяния точки, то и контраст K_0 даже при чистом атмосферном воздухе не будет равен единице. Поэтому справедливо из таблицы 2 принять $K_0 = 0,464$ при нулевой концентрации пыли. Перепишем формулу (12) в виде:

$$\rho_{амм} = \frac{1}{\chi_{\sigma} \cdot x} \cdot \ln\left(\frac{0,464}{K}\right). \quad (14)$$

В формуле (14) известны все величины кроме удельного показателя ослабления χ_{σ} . При расчете можно задать не сам показатель, а произведение $\chi_{\sigma} \cdot x$. Его несложно определить из таблицы 2. Например, зная эталонную массовую концентрацию $\rho_{амм} = 0,1$ мг/м³ и соответствующий ей контраст $K = 0,42$, произведение будет равно:

$$\chi_{\sigma} \cdot x = \frac{1}{0,1} \cdot \ln\left(\frac{0,464}{0,42}\right) = 0,94 (\text{м}^3 / \text{мг}). \quad (15)$$

Аналогично были рассчитаны произведения $\chi_{\sigma} \cdot x$ для эталонных массовых концентраций 0,2; 0,3; 0,4 мг/м³. В итоге получены значения: 0,94; 0,88; 0,96; 0,84 м³/мг. Поочередно подставляя эти значения и скорректированный контраст из таблицы 2 в формулу (14), были вычислены массовые концентрации пыли по оптическому контрасту. Считая массовую концентрацию пыли, измеренную гравиметрическим методом, за входной сигнал, а массовую концентрацию пыли, рассчитанную по оптическому контрасту за выходной сигнал, можно построить четыре статические характеристики преобразования видеокамеры SAMSUNG.

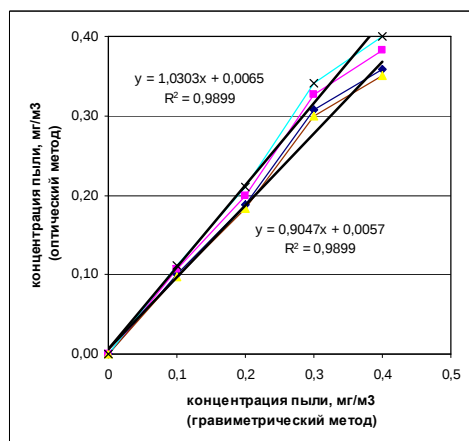


Рисунок 12 – Статические характеристики преобразования видеокамеры SAMSUNG

Графики изображены на рисунке 12. На графике, с помощью двух линий тренда, выделен диапазон изменения статической характеристики преобразования. Он лежит в пределах 12%. Коэффициент корреляции между рассматриваемыми величинами составляет, $R=0,995$. Таким образом, получена высокая корреляционная зависимость между массой взвешенных частиц пыли в атмосферном воздухе, измеренной гравиметрическим методом и по методу оптического контраста. Однако погрешность калибровки составляет 12%.

Исходя из формулы (15), можно рассчитать удельный показатель ослабления пыли χ_{σ} . Поскольку расстояние равно, $x = 30$ м, то $\chi_{\sigma} = 0,031$ м²/мг. Усредняя четыре значения χ_{σ} вычислено среднее значение удельного показателя ослабления с доверительным интервалом:

$$\chi_{\sigma} = 0,030 \pm 0,002 \quad (\text{м}^2 / \text{мг}). \quad (16)$$

Аналогичные расчеты были выполнены с данными, полученными с помощью сетевой купольной видеокамерой AXIS 233D. Нескорректированное изменение контраста показано на рисунке 13 пунктирной линией, скорректированное – штриховой линией, а линия тренда – сплошной.

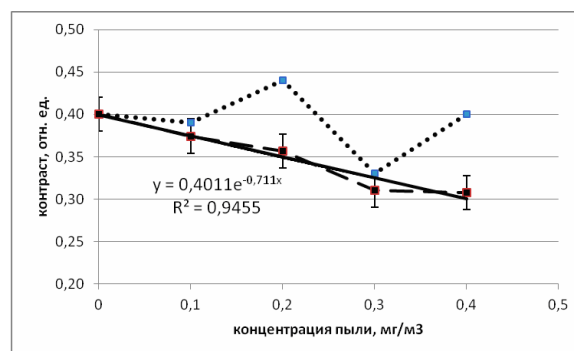


Рисунок 13 – Зависимость контраста от массовой концентрации пыли, полученная с помощью сетевой купольной видеокамеры AXIS 233D в пасмурную погоду

Коррекция экспериментальных данных осуществлена по корректирующим коэффициентам цифровой видеокамеры SAMSUNG (см. табл.2), поскольку выполнить лабораторные исследования и сравнить работу купольной видеокамеры и «Видеоскан» не представлялось возможным. Как видно из рисунка 13, несмотря на внешнюю похожесть графиков двух видеокамер, коэффициент

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ МАССОЙ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ, ИЗМЕРЕННОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И ПО МЕТОДУ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРАСТА

корреляции меньше: $R = 0,97$. Дальнейшие аналогичные расчеты позволили определить статические характеристики преобразования купольной видеокамеры AXIS 233D (см. рисунок 14).

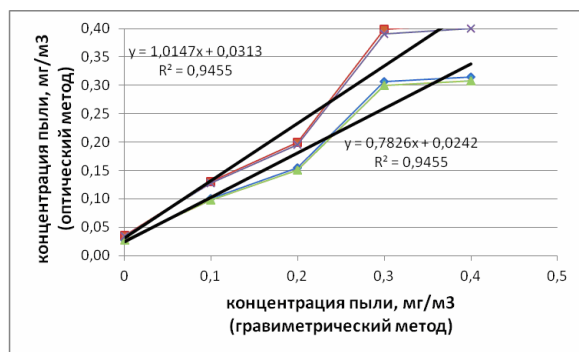


Рисунок 14 – Статические характеристики преобразования купольной видеокамеры AXIS 233D

Диапазон изменения статических характеристик составляет 23%.

Удельный показатель ослабления равен:

$$\chi_{\sigma} = 0,016 \pm 0,020 \quad (\text{м}^2 / \text{мг}). \quad (17)$$

Сравнивая обе видеокамеры, которые использовались в эксперименте, можно отметить, что более надежным и достоверным является результат, полученный с помощью видеокамеры SAMSUNG.

Выводы

Выполненные исследования показали высокую корреляционную зависимость между массой взвешенных частиц пыли в атмосферном воздухе, измеренной гравиметрическим методом, и массой взвешенных частиц, измеренной по оптическому контрасту в изображении тест-объекта в виде парных штрихов. Таким образом, метод определения массовой концентрации взвешенных частиц по оптическому контрасту может быть использован в системах экологического мониторинга атмосферного воздуха. Однако технические средства, примененные в экспериментальных исследованиях, не могут использоваться напрямую. Первый недостаток заключается в корректировке измеряемого контраста в изображении штрихов, что требует дополнительного прибора, например, люксметра. Один из путей решения этой проблемы – применение фильтров и активного источника

излучения без изменения времени накопления у применяемой видеокамеры. Вторым недостатком является калибровка видеокамеры по данным гравиметрических измерений. Этот недостаток может быть устранен путем уточнения удельного показателя ослабления для ряда взвешенных частиц как по размеру, так и по оптическим свойствам и его применения в косвенном измерении массовой концентрации взвешенных частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный экологический мониторинг в Москве: [сайт]. URL: <http://www.mosecom.ru/about/mosecom/> (дата обращения :03.05.2010).
2. Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Аэрозоли: [сайт]. URL: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/ru/tssts-2-2.html (дата обращения :03.05.2010).
3. Найдич В. А. Лидар. Программа обработки результатов лидарного зондирования атмосферного воздуха. Экология города: [сайт]. URL: <http://citysoft.mosmap.ru/Lidar/Lidar.htm> (дата обращения :03.05.2010).
4. М. Перевощикова, Г. Э. Сандоваль-Ромеро, В. Аргета-Диаз. Разработка оптического датчика для локального мониторинга загрязнения воздуха в мексико // Оптический журнал, 76, 5, 2009, с.32-37.
5. Пронин С.П., Кононова Е.С., Кальной Д.Г. Методическое и техническое обеспечение локальной системы экологического мониторинга атмосферы // Ползуновский Вестник, №2, 2010, с. 188 – 192.
6. Пронин С.П., Кононова Е.С. Способ измерения показателя ослабления/ Патент № 2381488. Опубликовано: 10.02.2010 Бюл. №4.
7. РД 52.04.186-89. Руководящий документ. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Москва, 1991 г.
8. Гуревич М.М. Фотометрия: теория, методы и приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
9. Асадов Х.Г., Аббасзаде Э.С. Дифференциальный метод определения основных оптических параметров атмосферного аэрозоля [Электронный ресурс]. URL: <http://www.docstoc.com/docs/30509403/The-differential-method-for-determination-of-major-optical-parameters-of-atmospheric-aerosol/>.
10. Разработки ЛОМО: [сайт]. URL: <http://www.lomo.ru/site/catalog>.
11. Вадзинский Р. Статистические вычисления в среде Excel. Библиотека пользователя – СПб.: Питер, 2008. – 608 с.

Статьи опубликованы в авторской редакции

*Компьютерная верстка, макет: Е. А. Зрюмов
Дизайн обложки: С. П. Пронин, Е. А. Зрюмов*

Издательство Алтайского государственного
технического университета им. И. И. Ползунова
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

Лицензия на издательскую деятельность
ЛР № 020822 от 21.09.98 г.

Подписано в печать 11.11.2011. Формат 60×84 1/8.
Усл. п. л. 21,74. Тираж 75 экз. Заказ 588

Отпечатано в типографии АлтГТУ
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46
тел. (8-3852) 29-09-48

Лицензия на полиграфическую деятельность
ПЛД №28-35 от 15.07.97 г.