

DOI: 10.58168/TBiEc2025_144-149

УДК 504.06

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРОМЫШЛЕННЫХ
ЗОН В КРУПНЫХ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТАХ**

**AUTOMATION OF ENVIRONMENTAL MONITORING OF INDUSTRIAL AREAS IN LARGE
SETTLEMENTS**

Ковун Д.А., студент ФГБОУ ВО **Kovun D.A.**, student FGBOU VO «Voronezh
«Воронежский государственный State University of Forestry and Technologies
лесотехнический университет им. Г.Ф. named after G.F. Morozov», Voronezh, Russia.
Морозова», Воронеж, Россия.

Стариков А.В., д.т.н., профессор ФГБОУ **Starikov A.V.**, DSc (Engineering), Professor
ВО «Воронежский государственный FGBOU VO «Voronezh State University of
лесотехнический университет им. Г.Ф. Forestry and Technologies named after G.F.
Морозова», Воронеж, Россия. Morozov», Voronezh, Russia.

Аннотация: в статье рассматриваются современные методы автоматизированного экологического мониторинга загрязнений воздуха в городах и промышленных зонах. Анализируются технологии датчиков, лазерного и спутникового зондирования, а также информационные системы для обработки данных. Представлены математические модели для определения концентраций загрязнителей и оценки экологической ситуации, что способствует своевременному реагированию и обеспечению экологической безопасности.

Abstract: this article discusses modern methods of automated environmental monitoring of air pollution in urban and industrial areas. It analyzes sensor technologies, laser and satellite remote sensing, as well as information systems for data processing. Mathematical models for determining pollutant concentrations and assessing the environmental situation are presented, which contribute to timely responses and ensuring environmental safety.

Ключевые слова: экологический мониторинг, автоматизация контроля загрязнений, датчики газа, лазерное зондирование, спутниковое наблюдение, математические модели, индекс AQI, выбросы промышленных предприятий, информационные системы, экологическая безопасность.

Keywords: environmental monitoring, pollution control automation, gas sensors, laser remote sensing, satellite observation, mathematical models, AQI index, industrial emissions, information systems, environmental safety.

Введение

В современном мире проблема загрязнения окружающей среды становится всё более острой, особенно в больших городах, где сосредоточены множество промышленных

предприятий и транспортных средств. Когда в таких городах строят новые фабрики или заводы, а люди всё больше используют автомобили с двигателями внутреннего сгорания, это приводит к тому, что в атмосферу выбрасывается огромное количество вредных веществ. Также быстрый рост городов способствует увеличению количества людей и техники, что в свою очередь увеличивает нагрузку на окружающую среду. Всё это негативно влияет как на здоровье людей, так и на состояние природы. В целях безопасности очень важно создавать системы экологического мониторинга, которые смогут эффективно отслеживать уровень загрязнений. Благодаря автоматизации таких систем можно получать данные о состоянии воздуха, воды и почвы практически в реальном времени. Это помогает быстро реагировать, если уровни вредных веществ превышают допустимые нормы, и принимать меры для снижения негативного воздействия промышленных объектов.

В статье рассмотрено современное состояние технологий автоматизированного контроля загрязнений именно в промышленных районах крупных городов. Также будут проанализированы их особенности, преимущества и возможные направления развития в будущем.

1 Современные требования к системам экологического мониторинга

Современные системы для мониторинга окружающей среды должны быть очень чувствительными и уметь точно определять конкретные загрязнители [1]. Они должны работать стабильно в разных условиях, автоматически передавать собранные данные в центры обработки информации и быстро реагировать, если уровень вредных веществ превышает допустимые нормы. Так же такие системы требуют высокой точности измерений и должны работать полностью в автоматическом режиме, не требующем вмешательства человека. Важно, чтобы они могли легко интегрироваться с информационными системами города или региона, а оборудование было надежным и долговечным [2]. Также очень важно, чтобы при возникновении чрезвычайных ситуаций системы могли оперативно оповестить соответствующие службы.

Эффективная автоматизация таких систем помогает не только повысить качество контроля за состоянием окружающей среды, но и значительно снизить расходы на проведение регулярных измерений вручную.

2 Технологии автоматизированного контроля загрязнений

2.1 Использование высокочувствительных датчиков

Современные датчики могут измерять уровень разных веществ в воздухе, например, диоксида серы (SO_2), азота (NO_2) и даже летучие органические соединения (ЛОС). Для того чтобы определить, сколько именно газа в воздухе, используют разные методы, например, спектроскопию, хемилюминесценцию или инфракрасную спектроскопию. Эти технологии помогают точно и быстро получать информацию о составе воздуха.

Расчет концентрации газа по сигналу датчика производится по следующей формуле (линейная модель):

$$C = \frac{S - S_0}{k},$$

где C – концентрация газа, ppm;

S – сигнал датчика (например, интенсивность света или электрический ток);

S_0 – базовый сигнал при отсутствии загрязнения;

k – коэффициент чувствительности датчика.

При необходимости калибровки используется следующая нелинейная модель:

$$C = a \times (S - S_0)^b,$$

где a, b – параметры калибровочной кривой, определяемые экспериментально.

2.2 Автоматические системы экологического мониторинга на промышленных объектах

На промышленных предприятиях ставят системы для контроля выбросов прямо на дымовых трубах или в технологических потоках [3]. Чтобы понять, сколько вредных веществ выходит в атмосферу, используют уравнение массового расхода этих веществ:

$$Q = C_g \times v \times A,$$

где Q – массовый расход загрязнителя, г/с;

C_g – концентрация газа, г/м³;

v – средняя скорость газового потока, м/с;

A – площадь поперечного сечения трубы, м².

Концентрацию газа C_g можно определить, используя результаты измерений объема:

$$C_g = C_{ppm} \times \frac{M}{24.45},$$

где C_{ppm} – концентрация, ppm;

M – молекулярная масса вещества, г/моль;

значение 24.45 – молярный объем газа при стандартных условиях, л/моль.

2.3 Дистанционные методы зондирования

Лазерные лидары работают на основе того, что лазерное излучение рассеивается при прохождении через газ. По разнице интенсивности лазерного сигнала можно определить, сколько именно газа находится в воздухе. Для этого используется следующая формула:

$$C = -\frac{1}{\sigma} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right),$$

где I_0 – интенсивность лазерного сигнала без наличия загрязнителя;

I – измеренная интенсивность после прохождения через атмосферу;

σ – коэффициент поглощения газа при длине волны лазера.

Следующее уравнение основано на законе Бугера-Ламберта-Бера:

$$I = I_0 e^{-\sigma C L},$$

где L – длина пути лазерного луча через газовую среду.

2.4 Спутниковый экологический мониторинг

Чтобы определить, сколько загрязнителей есть в воздухе или воде, используются данные со спутниковых сенсоров. Эти сенсоры измеряют, как отражается солнечный свет или другое излучение от поверхности. Анализируя спектральные характеристики этого

отраженного света, можно понять, какие вещества там присутствуют и в каком количестве. Для этого следует использовать формулу

$$C = f(R_\lambda),$$

где R_λ - отражательная способность поверхности при длине волны λ ;

функция $f()$ определяется методом переноса модели излучения или алгоритмами машинного обучения.

3 Информационные технологии и автоматизация систем мониторинга

Современные системы используют базы данных и специальные аналитические модели, чтобы вычислить индекс загрязнения воздуха. Для того чтобы понять, насколько загрязнен воздух в целом, используют индекс AQI – индекс качества воздуха, который рассчитывают по следующей формуле:

$$AQI = \max_i(I_i(C_i)),$$

где C_i – концентрация конкретного загрязнителя;

$I_i(C_i)$ – функция, преобразующая концентрацию каждого вещества в индекс, задается с помощью таблиц с нормативными значениями.

Например, для SO_2 при концентрации C_{SO_2} :

$$I_{SO_2} = \begin{cases} 0 - 50, C_{SO_2} < 0,125 \text{ ppm} \\ 51 - 100, 0,125 \text{ ppm} < C_{SO_2} < 0,375 \text{ ppm} \\ \dots \end{cases}$$

Эти концентрации находятся в таблице нормативных значений.

4 Технология радиолокационного зондирования

Помимо лазерных методов зондирования есть еще радиолокационные способы. Их работа заключается в отправлении сигнала в атмосферу и анализа того, как он отражается и как распределяется во времени. На основе этих данных можно определить уровень загрязнения воздуха, используя уравнение для радиолокационной рассеянной мощности, которое помогает определить, насколько загрязнена атмосфера:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \right) |\alpha|^2,$$

где P_r – мощность принятого сигнала;

P_t – мощность передатчика;

G_t, G_r – коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника;

R – расстояние до объекта;

$|\alpha|^2$ – модуляция рассеянной поверхности или слоя атмосферы.

5 Опыт внедрения автоматизированных систем мониторинга в России

В России действуют стандарты ГОСТ 17.2.3.01-86 [4]. Эти стандарты имеют преимущество перед зарубежной Директивой 2008/50/ЕС [5]. Это преимущество заключается в большем количестве экологических постов при той же численности населения (таблица 1), однако в ГОСТ 17.2.3.01-86 не предполагается замера частиц фракций РМ 10 и

PM 2,5 (таблица 2), что является существенным недостатком. Представленные в работе методы возможно использовать в целях мониторинга этих частиц.

Таблица 1 – Сравнение количества постов в России и ЕС

Численность населения (человек)	Количество постов ГОСТ 17.2.3.01-86	Количество постов Директива 2008/50/ЕС
до 50 тыс.	1	1
50-100 тыс.	2	1
100-200 тыс.	2-3	1
200-500 тыс.	3-5	1-2
500 тыс.-1 млн.	5-10	2-3
более 1 млн.	10-20	4-10

Таблица 2 – Регистрируемые загрязняющие вещества

Загрязняющее вещество	Россия	ЕС
PM10, PM 2,5	—	+
Мышьяк, никель, кадмий, ртуть	+	+
Бензол	+	+
Озон	+	+
Диоксид азота, оксид азота	+	+
Оксид углерода	+	+
Диоксид серы	+	+
Свинец	+	+
Бензпирен	+	+
Взвеси	+	+

Заключение

Автоматизация экологического мониторинга представляет собой важный шаг вперед в области охраны окружающей среды. Использование современных методов измерений, математических моделей и аналитических формул позволяет не только получать достоверные данные о текущем состоянии природы, но и предсказывать возможные изменения в будущем. Такой подход обеспечивает более оперативное реагирование на экологические угрозы и способствует принятию обоснованных решений для защиты окружающей среды и здоровья населения. В итоге, внедрение автоматизированных систем мониторинга делает управление экологической ситуацией более эффективным, надежным и перспективным, что является важным вкладом в сохранение природы для будущих поколений.

Список литературы

1. Экологический мониторинг : учебное пособие / Е. П. Лысова, О. Н. Парамонова, Н. С. Самарская, Н. В. Юдина. – М.: ИНФРА-М, 2023. – 151 с.
2. Ашихмина, Т. Я. Методы экологического мониторинга окружающей среды : учебно-методическое пособие / Т. Я. Ашихмина. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 372 с.
3. Голицын, А. Н. Промышленная экология и мониторинг загрязнения природной среды / А. Н. Голицын. – М.: ОНИКС, 2010. – 336 с.
4. ГОСТ 17.2.3.01-86 Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов. Дата введения 1 января 1987 г.
5. Директива ЕС 2008/50/ЕС О качестве атмосферного воздуха и мерах его очистки. Дата введения 21 мая 2008 г.

References

1. Lysova E.P., Paramonova O.N., Samarskaya N.S., Yudina N.V. Ekologicheskii monitoring [Environmental Monitoring]. Moscow: INFRA-M, 2023, 151 p. (in Russian).
2. Ashikhmina T.Ya. Metody ekologicheskogo monitoringa okruzhayushchei sredy [Methods of Environmental Monitoring]. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2024, 372 p. (in Russian).
3. Golitsyn A.N. Promyshlennaya ekologiya i monitoring zagryazneniya prirodnoi sredy [Industrial Ecology and Environmental Pollution Monitoring]. Moscow: ONIKS, 2010, 336 p. (in Russian).
4. GOST 17.2.3.01-86. Okhrana prirody. Atmosfera. Pravila kontrolya kachestva vozdukha naselennykh punktov [Environmental Protection. Atmosphere. Rules for Air Quality Monitoring in Populated Areas]. Introduced on January 1, 1987 (in Russian).
5. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council on ambient air quality and cleaner air for Europe. Introduced on May 21, 2008.