

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ

### STATISTICAL METHODS OF DATA PROCESSING OF EMISSIONS MONITORING OF POLLUTING SUBSTANCES IN ATMOSPHERIC AIR

УДК 504.064.36

И.С. Карпушенко<sup>1\*</sup>, А.Д. Анискевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Витебский государственный технологический университет

<sup>2</sup> ОАО «БелКредо»

<https://doi.org/10.24411/2079-7958-2019-13615>

I. Karpushenko<sup>1\*</sup>, A. Aniskevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Vitebsk State Technological University

<sup>2</sup> Public Corporation «BelKredo»

#### РЕФЕРАТ

ЗАГРЯЗНЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА, МОНИТОРИНГ ВЫБРОСОВ, АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, КОНТРОЛЬНЫЕ КАРТЫ ШУХАРТА

Статья посвящена расширению информационно-аналитических возможностей специалистов предприятий энергетики, осуществляющих мониторинг экологических показателей, за счет применения статистических методов анализа точности и стабильности процессов выработки энергии.

Предложенный подход к анализу результатов мониторинга концентрации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу позволяет оценить статистическую управляемость процесса выработки электроэнергии на предприятиях отрасли. Результаты анализа контрольных карт, построенных по фактическим данным мониторинга выбросов в атмосферу одного из отечественных предприятий энергетической отрасли, свидетельствуют об их информативности и принципиальной применимости в условиях контроля экологических показателей. Модернизация программного обеспечения с целью автоматизации построения контрольных карт по текущим данным мониторинга выбросов загрязняющих веществ позволяет сформировать ценный информационный ресурс как для причинно-следственного анализа производственной ситуации, так и для обеспечения процессов оценки результатов и улучшения в системе экологического менеджмента предприятия.

#### ABSTRACT

POLLUTANT EMISSIONS MONITORING, AUTOMATED CONTROL SYSTEMS, STATISTICAL METHODS, SHEWHART CHARTS

Analysis of monitoring data of pollutants emissions into the atmosphere with the use of statistical methods can improve the effectiveness and informativeness of the processes of environmental management system. The article demonstrates the possibility of using Shewhart control cards for the detection and identification of the uncontrolled state of the process of electric energy production.

This approach to the analysis of data on the control of emissions of pollutants into the atmosphere is of practical interest for enterprises of various industries, including energy. Statistical methods enable to obtain a valuable information resource in the analysis of individual indicators, and the state of the process as a whole.

\* E-mail: [karinstep@rambler.ru](mailto:karinstep@rambler.ru) (I. Karpushenko)

Основными источниками выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в Республике Беларусь являются промышленные предприятия. Национальная система непрерывного мониторинга окружающей среды предполагает проектирование и внедрение автоматизированных систем контроля (АСК) выбросов на промышленных предприятиях. АСК – это информационно-измерительная система, состоящая из аналитического оборудования и других устройств, выполняющая непрерывные измерения и регистрацию концентраций и выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух [1]. АСК состоит из газоанализаторов, средств измерения расхода и физических пара-

метров (температура, давление, влажность) отходящих газов, средств сбора, обработки, хранения и передачи информации, регистрации и отображения результатов измерений, вспомогательного оборудования (рисунок 1).

Согласно [1] информация, полученная при использовании АСК, должна включать: текущие значения концентрации загрязняющих веществ ( $мг/м^3$ ), концентрацию кислорода (%), усредненные за 20 минут выбросы загрязняющих веществ ( $г/с$ ), расход отходящих газов ( $м^3/с$ ), температуру отходящих газов ( $^{\circ}C$ ) и другие показатели.

В рамках АСК выбросов загрязняющих веществ все оперативные данные первичных

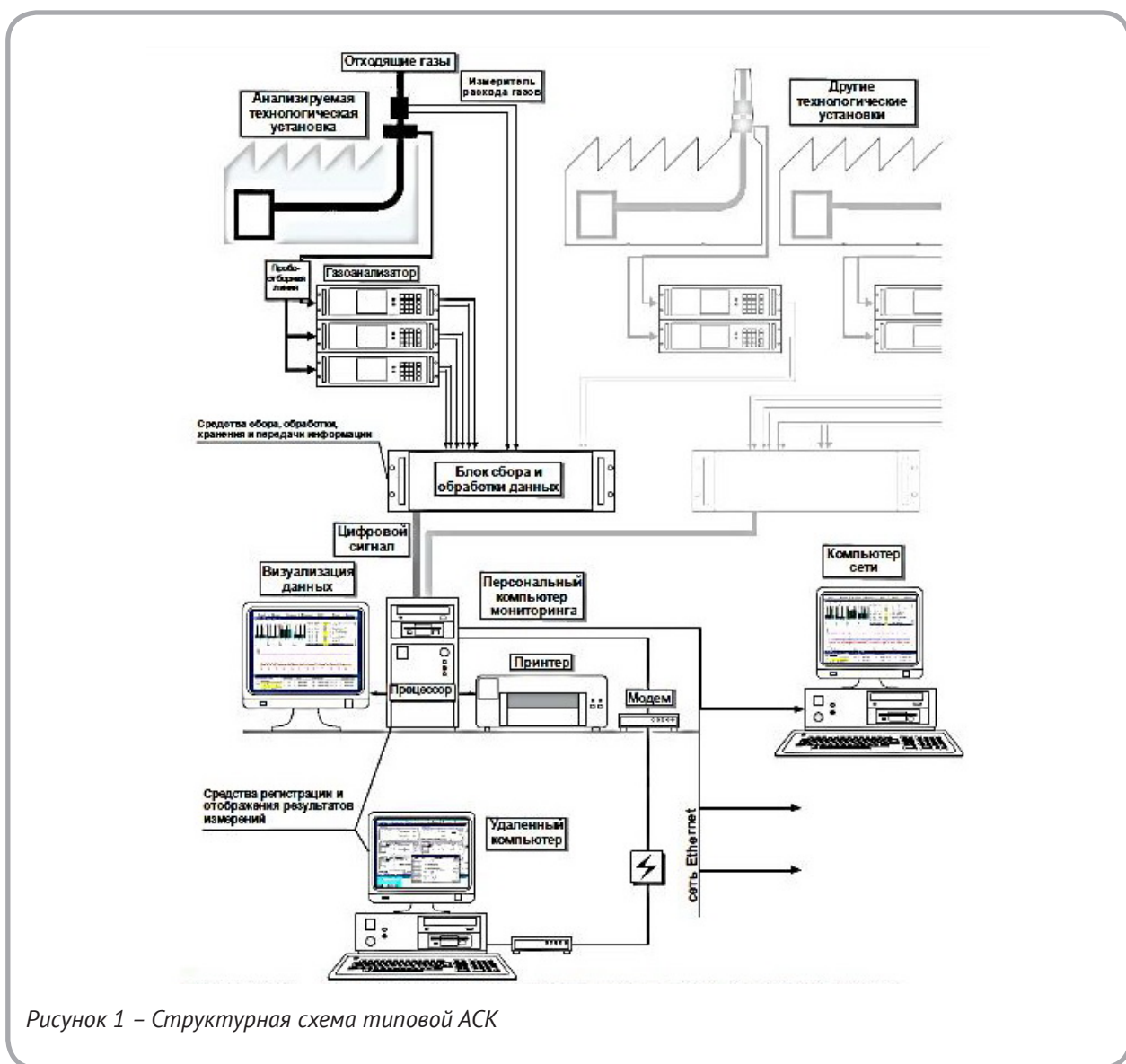


Рисунок 1 – Структурная схема типовой АСК

преобразователей (газоанализаторов, расходомеров, датчиков, контактов и т. п.) аккумулируются на сервере. Обработка данных в АСК сводится к графической визуализации и сравнению со значениями предельно-допустимых выбросов (ПДВ) [2, 3]. Таким образом, значения, превышающие ПДВ, регистрируются как свершившееся критическое событие. Система обработки собранных АСК данных не использует приемы статистической оценки значений, что существенно сужает возможности принятия предупреждающих действий, направленных на эффективное управление процессами загрязнения атмосферного воздуха.

Целью представленной работы является оценка точности и управляемости процесса загрязнения атмосферного воздуха с использованием статистических методов (построение гистограмм распределения значений, контрольных карт Шухарта), которая позволяет своевременно корректировать производственный процесс. Основной задачей работы является расширение информационного ресурса о состоянии производственного процесса по имеющимся у предприятия данным мониторинга выбросов в атмосферный воздух.

Областью исследований являлось отечествен-

ное предприятие энергетического комплекса, относящееся к I категории по степени воздействия выбросов загрязняющих веществ на атмосферный воздух. В процессе производства электроэнергии предприятием выделяется и выбрасывается в атмосферный воздух более 30 наименований загрязняющих веществ от 133 источников, из них оснащённых газоочистительными установками (ГОУ) – 10. Основные загрязняющие вещества при сжигании топлива – диоксид азота, оксид азота, оксид углерода, диоксид серы, бенз(а)пирен, дополнительно при сжигании мазута образуются мазутная зола и сажа.

Карта-схема расположения источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, объектов локального мониторинга предприятия представлена на рисунке 2. Измерительное сечение системы контроля выбросов загрязняющих веществ находится на дымовых трубах, к которым подключено несколько котлоагрегатов. АСК выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух представляет собой программно-технический комплекс REGION-energo, разработанный НПЦ «Европрибор» [2].

Комплекс обеспечивает сбор данных с первичных преобразователей (газоанализаторов,

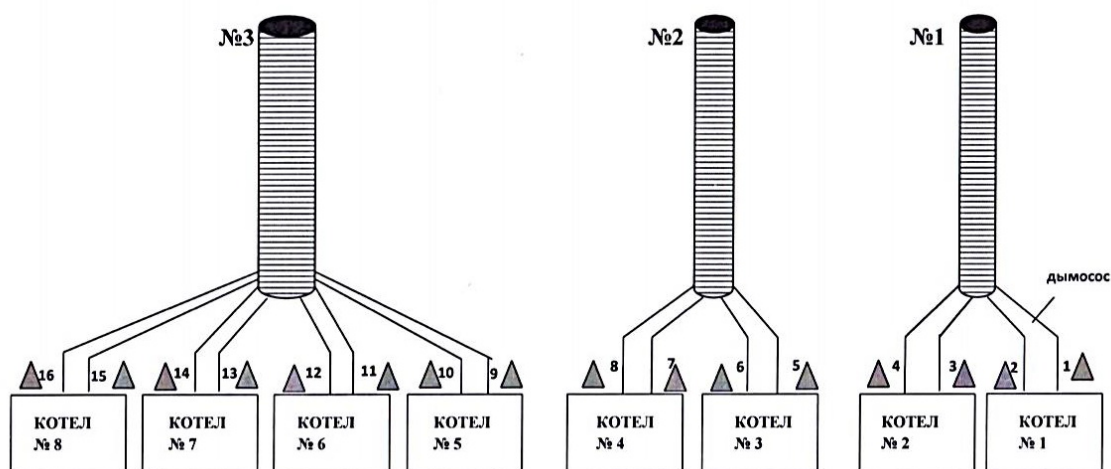


Рисунок 2 – Карта-схема расположения источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух и объектов локального мониторинга предприятия: № 1, 2, 3 – источники выбросов котельного цеха предприятия; ▲ 1–16 – пункты наблюдений (точки отбора проб)

расходомеров, датчиков, контактов и т. п.) АСК, их обработку в соответствии с алгоритмом [1] и передачу в локальную сеть экологического отдела предприятия, визуализацию данных и их архивирование.

Установлено, что данные о концентрации загрязняющих веществ регистрируются и визуализируются в форме графиков в общей системе координат ( $OY$  – концентрация выбросов,  $мг/м^3$ ;  $OX$  – время измерения), а архивирование производится путем передачи данных на USB-флеш в табличной форме приложения Excel стандартного пакета программ Microsoft Office. Такой способ позволяет производить мониторинг концентраций выбросов и их сравнение с предельно-допустимыми значениями, как в большинстве действующих АСК.

Однако при применении статистических методов анализа точности и стабильности процессов информационный ресурс для анализа состояния, в том числе и с точки зрения экологии, может быть расширен. В соответствии с [4] предприятие должно оценивать показатели своей экологической деятельности, а в соответствии с

[5] – анализировать и оценивать соответствующие данные и информацию, получаемую в ходе мониторинга и измерений. Причем в качестве методов проведения анализа данных рекомендованы статистические.

По данным мониторинга АСК выбросов в атмосферный воздух  $CO$  и  $NO$  проведен анализ гистограмм распределения значений показателей концентрации загрязняющих веществ, который показал, что данные подчиняются нормальному закону распределения (рисунки 3, 4). Выборки сформированы по данным трехкратных измерений концентрации в течение часа с интервалом в 20 мин. Интервал мониторинга – 24 часа.

Гистограмма распределения значений концентрации  $CO$  в выбросах в атмосферный воздух демонстрирует высокую точность процесса производства электроэнергии и значительный запас точности, так как все значения существенно удалены от ПДВ =  $125 мг/м^3$ . Левостороннее смещение гистограммы относительно поля допуска может трактоваться как позитивный признак. Значение коэффициента точности расчи-

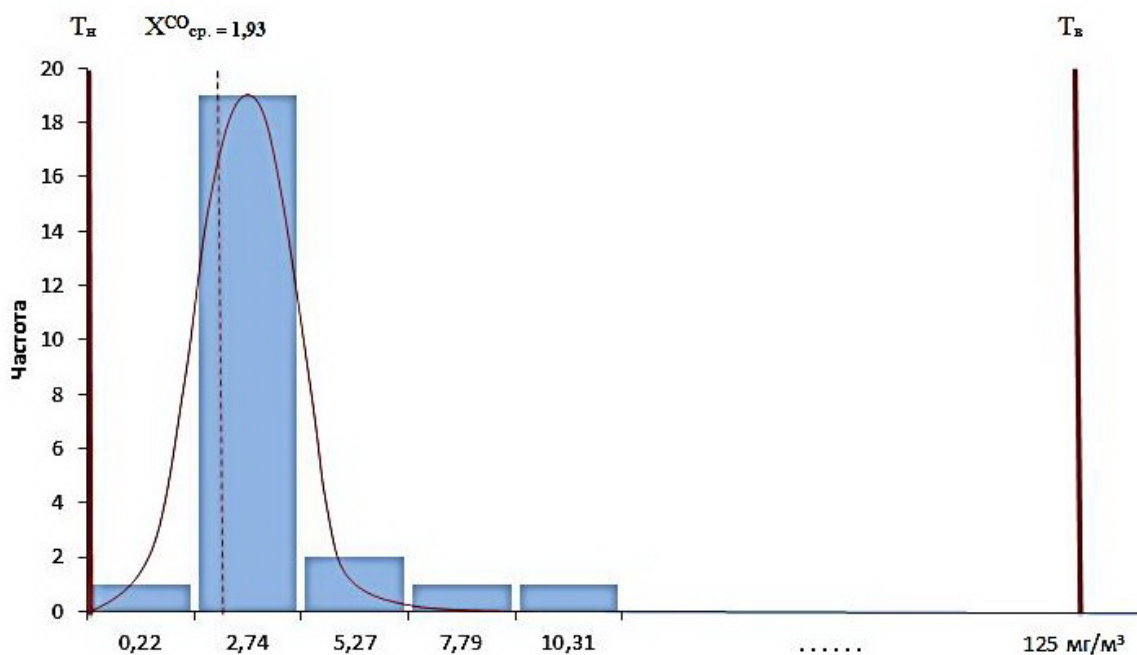


Рисунок 3 – Гистограмма распределения значений концентрации  $CO$  в выбросах в атмосферный воздух

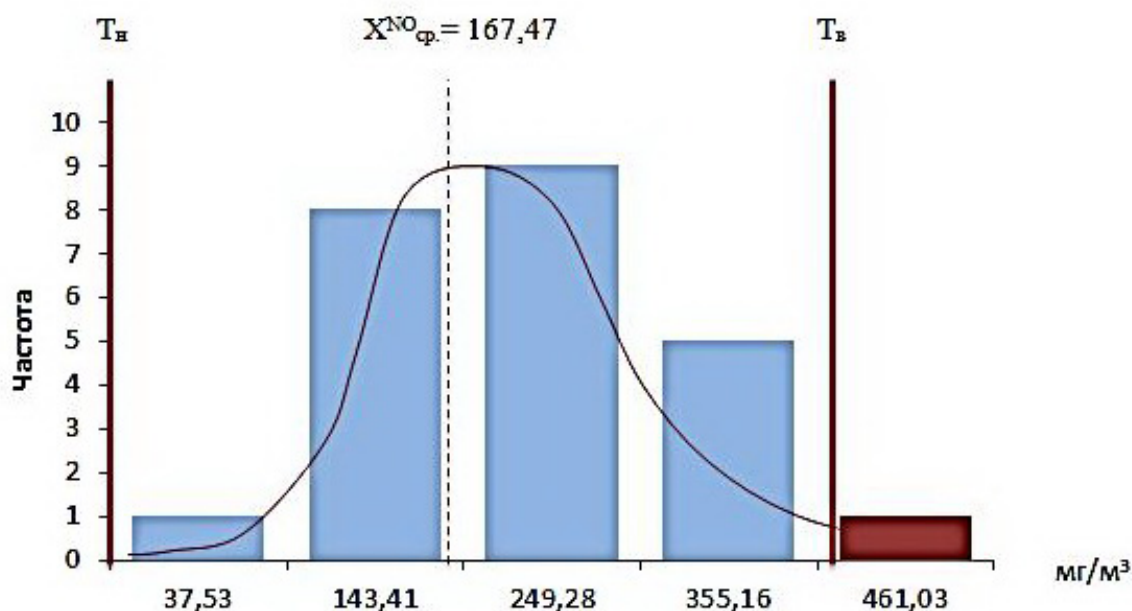


Рисунок 4 – Гистограмма распределения значений концентрации NO в выбросах в атмосферный воздух

тывается по формуле:

$$K_T = \frac{6S}{T_B - T_H}, \quad (1)$$

где  $S$  – среднее квадратическое отклонение;  $T_в$ ,  $T_н$  – верхняя и нижняя границы допуска соответственно.

Значение коэффициента точности значений концентрации CO в выбросах в атмосферный воздух:  $K_m^{CO} = 0,11$ . При значении  $K_m < 0,75$  процесс считается удовлетворительно точным [6].

Гистограмма распределения значений концентрации NO в выбросах в атмосферный воздух демонстрирует низкую точность процесса производства электроэнергии и отсутствие запаса точности, так как имеются значения, выходящие за верхнее поле допуска ПДВ = 400 мг/м³. Значение коэффициента точности значений концентрации NO в выбросах в атмосферный воздух:  $K_m^{NO} = 1,81$ , что характеризует процесс как неудовлетворительно точный.

Гистограмма распределения данных позволяет не только установить нарушения границ допуска значений, но и закономерности, трудно

различимые в таблице с набором цифр. Расчет коэффициента точности позволяет дать количественную оценку состояния процесса, сравнить динамику точности процесса во времени, например, для определения эффективности корректирующих мероприятий.

В качестве метода предупреждения выхода значений за границы ПДВ целесообразно применить контрольные карты, которые позволяют выявить нестабильность процесса, установить наличие неслучайных причин его значительной изменчивости, своевременно принять меры по их устранению.

На основании данных мониторинга выбросов в атмосферный воздух CO построена контрольная карта средних значений и размахов ( $\bar{X}$ -R-карта), представленная на рисунке 5. Уровни контрольных линий для  $\bar{X}$ -R-карты определены по формулам [2]:

– для  $\bar{X}$ -карты:

$$\begin{aligned} CL &= \bar{\bar{X}}, \\ UCL &= \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}, \\ LCL &= \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}; \end{aligned} \quad (2)$$



– для *R*-карты:

$$\begin{aligned} CL &= \bar{R}, \\ UCL &= D_4 \bar{R}, \\ LCL &= D_3 \bar{R}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $A_2, D_4, D_3$  – коэффициенты, значения которых зависят от объема подгруппы (для  $n = 3$   $A_2 = 1,02; D_4 = 2,57; D_3 = 0$ ),  $\bar{X}$  – среднее значение по подгруппам;  $\bar{R}$  – средний размах по подгруппам значений.

Взаимное расположение точек на *R*-карте демонстрирует выходы за верхний контрольный предел (в 4 и 7 точках). Это свидетельствует о наличии неслучайных причин, вызывающих увеличение размаха и выход его за границы статистического управления. Обусловленность увеличения размаха значений концентрации оксида углерода необходимо анализировать по отношению к конкретной точке измерения, с учетом возможностей измерительного оборудования.

В целом процесс выброса в атмосферу *CO* со

статистической точки зрения стабилизировался и после выхода за границы регулирования вернулся в управляемое состояние. Более того, для *R*-карты в точках 2, 3, 5, 6, 8–14, 17–21 наблюдается позитивная тенденция минимизации размаха как характеристики рассеивания.

При анализе  $\dot{X}$ -карты также наблюдается выход за границы статистического регулирования (в 4, 7, 22, 23 точках). Это негативная тенденция, в то время как приближение к нижней контрольной границе с 8-й по 21-ю точки можно рассматривать как благоприятное снижение концентрации *CO* (минимизация негативного показателя). Сравнение значений  $\dot{X}$ -карты со значением ПДВ = 125 мг/м<sup>3</sup> позволяет сделать вывод о соответствии показателя нормативным требованиям. При общем «благополучии» значений концентрации *CO* относительно ПДВ,  $\dot{X}$ -*R*-карта демонстрирует неуправляемое состояние процесса выработки электроэнергии на предприятии по экологическим показателям.

Дополнительно с помощью  $\dot{X}$ -*R*-карты проанализированы результаты мониторинга кон-

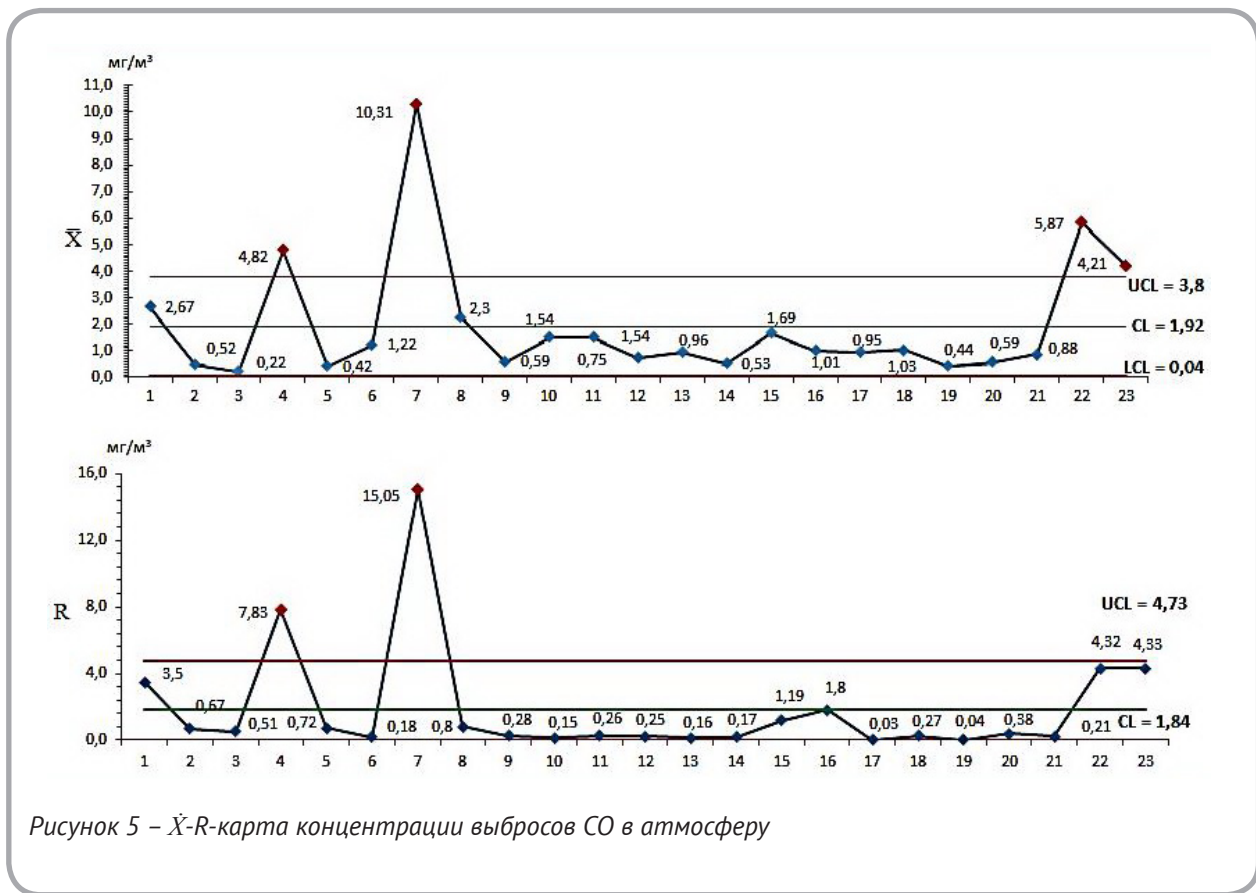


Рисунок 5 –  $\dot{X}$ -*R*-карта концентрации выбросов *CO* в атмосферу

центрации **NO** в выбросах в атмосферу. В результате по данному показателю так же установлено неуправляемое состояние процесса выработки электроэнергии предприятием. Причем установлен не только массовый выход (17 точек из 23) за контрольные пределы, но и единичное превышение ПДВ, который для данного показателя равен  $400 \text{ мг/м}^3$  (рисунок 6).

Выход точки (точек) за контрольные границы с общих позиций означает сдвиг процесса в сторону хаоса, вызванный неслучайными причинами, потерю управляемости. Дальнейшее поведение процесса предсказать нельзя, так как он подвержен непредсказуемым переменам [7].

Причинно-следственный анализ неуправляемого состояния процесса производства электроэнергии по ряду экологических показателей должен быть проведен специалистами предприятия с учетом производственной системы, применяемых методов управления и реализации процессов, технического обеспечения и т. п. С

общих позиций основными факторами, обуславливающими отсутствие управляемости процесса, могут быть вид и качество применяемого топлива (газ, мазут), состояние измерительной системы, эффективность систем очистки атмосферного воздуха и другие.

Элементом научной новизны работы является применение известных методов обработки данных, но ограниченно используемых в системах экологического менеджмента предприятий, для расширения информационно-аналитических возможностей специалистов, осуществляющих мониторинг экологических показателей, поддержки принятия управленческих решений.

В ходе работы установлено, что анализ распределения значений контролируемых параметров позволяет получить численную оценку точности процесса, а применение контрольных карт – оценить управляемость процесса загрязнения предприятием атмосферного воздуха. В существующей практике мониторинга действующей

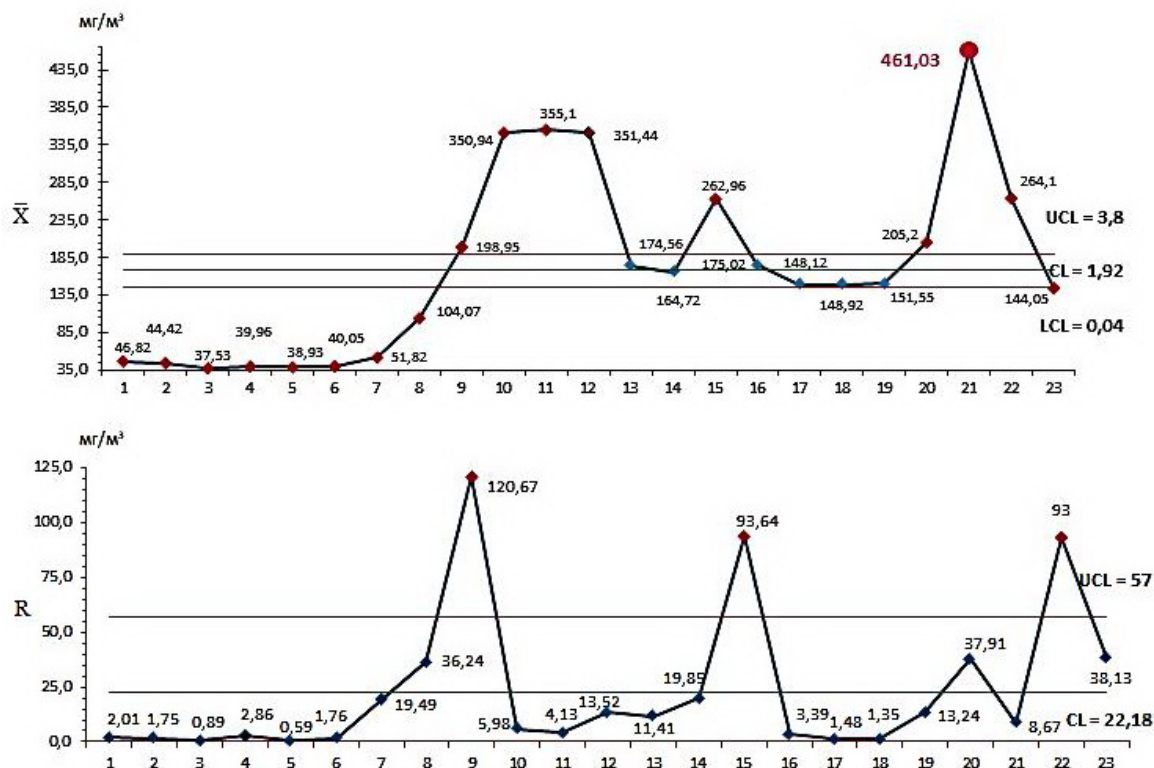


Рисунок 6 – X-R-карта концентрации выбросов NO в атмосфере

щих значений показателей оценивается только их соответствие регламентированным ПДВ, что недостаточно при системном подходе к управлению окружающей средой, направленном на предупреждение критических значений экологических показателей.

В результате оценки точности и управляемости процесса загрязнения атмосферного воздуха с использованием статистических методов установлено:

- практика мониторинга АСК выбросов в атмосферный воздух **СО** и **NO** ограничивается сравнением значений с уровнем ПДВ, причем единичные превышения нормативных значений трактуются как статистические выбросы;

- анализ распределения значений контролируемых показателей позволяет оценить меру центральной тенденции, ее расположение относительно границы ПДВ, точность процесса

производства электроэнергии и ее запас по контролируемым показателям;

- применение контрольных карт позволило оценить состояние производственного процесса как неуправляемое при соответствии значений контролируемых показателей нормативам ПДВ;

- выход за границы статистического регулирования значений контролируемых показателей, отмеченный на контрольных картах, свидетельствует о наличии неслучайных причин неуправляемого состояния процесса;

- практическое использование предложенных статистических методов для анализа результатов мониторинга в системе экологического менеджмента предприятия повышает достоверность выводов о состоянии производственных процессов и позволяет своевременно реагировать на его изменения.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ТКП 17.13-01 – 2008. *Охрана окружающей среды и природопользование. Мониторинг окружающей среды. Правила проектирования и эксплуатации автоматизированных систем контроля за выбросами загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух*, Введ. 2008-02-01, Минприроды, Минск, 2008, 21 с.
2. Программно-технический комплекс АСК выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух REGION-energo (2019), режим доступа: <https://www.aplisens.by/wp-content/uploads/2017/03/Programmno-tehnicheskii-kompleks-ASK-vibrosov.pdf> (дата доступа: 1.04.2019).
3. Внедрение автоматизированной системы непрерывного контроля выбросов основных загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух на Могилевской ТЭЦ-2 (2019), режим доступа: [#### REFERENCES](http://simatek.by/ru/vnedrenie-avtomatizirovannoj-sistemyi-</a></li>
</ol>
</div>
<div data-bbox=)

1. ТКП 17.13-01 – 2008. *Environmental protection and management. Environmental monitoring. Rules of design and operation of automated control systems for emissions of pollutants and greenhouse gases into the atmosphere*, Vved. 2008-02-01, Minprirody, Minsk, 2008, 21 p.
2. Program and technical complex of ACS emissions of pollutants and greenhouse gases into the air REGION-energo [Programmno-tehnicheskii kompleks ASK vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv i parnikovyx gazov v atmosferynyy vozdukh REGION-energo], (2019), available at: <https://www.aplisens.by/wp-content/uploads/2017/03/Programmno-tehnicheskii-kompleks-ASK-vibrosov.pdf> (accessed 1.04.2019).
3. Introduction of an automated system for continuous monitoring of emissions of major pollutants and greenhouse gases into the air at Mogilev CHPP-2 [Vnedreniye avtomatizirovannoy sistemy nepreryvnogo kontrolya vybrosov osnovnykh zagryaznyayushchikh



nepreryivnogo-kontrolya-vyibrosov-osnovnyix-zagryaznyayushhix-veshhestv-i-parnikovyix-gazov-v-atmosfernyij-vozdukh-na-mogilevskoj-tecz-2.html (дата доступа: 1.04.2019).

4. СТБ ISO 14001-2017. *Системы управления (менеджмента) окружающей среды. Требования и руководство по применению.* – Введ. 2017-07-01, Госстандарт, Минск, 2017, 30 с.
5. СТБ ISO 9001-2015. *Системы менеджмента качества. Требования.* – Введ. 2016-06-03, Госстандарт, Минск, 2015, 24 с.
6. Горленко, О. А. (2018), *Статистические методы в управлении качеством*, Москва, 2018, 270 с.
7. Уилер, Д., Чамберс, Д. (2017), *Статистическое управление процессами: оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта*, Москва, 2017, 409 с.
- veshchestv i parnikovykh gazov v atmosfernyy vozdukh na Mogilevskoy TETS-2] (2019), available at: <http://simatek.by/ru/vnedrenie-avtomatizirovannoj-sistemyi-nepreryivnogo-kontrolya-vyibrosov-osnovnyix-zagryaznyayushhix-veshhestv-i-parnikovyix-gazov-v-atmosfernyij-vozdukh-na-mogilevskoj-tecz-2.html> (accessed 1.04.2019).
4. STB ISO 14001-2017. *Environmental management systems. Requirements with guidance for use.* – Vved. 2017-07-01, Gosstandart, Minsk, 2017, 30 p.
5. STB ISO 9001-2015. *Quality management system. Requirements.* – Vved. 2016-06-03, Gosstandart, Minsk, 2015, 24 p.
6. Gorlenko, O. A. (2018), *Statisticheskiye metody v upravlenii kachestvom* [Statistical methods in quality management], Moscow, 2018, 270 p.
7. Uiler, D., Chambers, D. (2017), *Statisticheskoye upravleniye protsessami: optimizatsiya biznesa s ispolzovaniyem kontrolnykh kart Shukharta* [Statistical process management: business optimization using Shewhart control charts]. Moscow, 2017, 409 p.

Статья поступила в редакцию 13. 03. 2019 г.