

Разработка метода оперативного выявления опасной загрязненности атмосферы городов с помощью мер рекуррентности

Б. Б. Поспелов, Е. А. Рыбка, Р. Г. Мелешенко, П. Ю. Бородич, С. А. Горносталя

Разработан метод оперативного выявления опасной загрязненности атмосферы городов, который основывается на динамических мерах рекуррентности (повторяемости) состояний вектора концентраций загрязнений. Новый научный результат состоит в использовании нетрадиционной модификации известных мер рекуррентности, базирующейся на динамическом оконном усреднении текущей рекуррентности состояний концентрации атмосферных загрязнений. Один тип окна имеет нарастающую в реальном времени измерений ширину. Другой тип использует перемещаемое во времени измерений окно фиксированной ширины. Модифицированные меры учитывают комплексный характер явных и скрытых дестабилизирующих факторов, влияющих на текущую концентрацию загрязнений в пункте контроля. При этом отмечается, что не требуется учет традиционных метеорологических и других условий при выявлении опасных загрязненностей атмосферы. Разработанный метод позволяет оперативно выявлять не только явные, но и скрытые опасные загрязнения воздушного бассейна городов и повышать тем самым результативность и своевременность мероприятий по снижению вредного воздействия загрязнений атмосферы на население и окружающую среду. При экспериментальной проверке метода в качестве опасного загрязнителя рассматривалась двуокись азота. Экспериментально установлено, что динамика концентрации двуокиси азота в атмосфере типовой городской конфигурации имеет фрактальную структуру, зависящую от мест контроля загрязненности. При этом для структур характерно наличие элементов периодической и экстремальных топологий с резкими изменениями динамики. Установлено, что модифицированные меры, характеризуют особенности конкретных структур и позволяет выявлять не только явные, но и скрытые опасности загрязненности атмосферы. В рассматриваемом эксперименте динамика модифицированных мер изменяется от нуля до 0,78 ед. Показано, что максимальные значения мер принадлежат интервалу наблюдения, определяемому 12–36 отсчетами. Установлено, что в рассматриваемых пунктах контроля текущие концентрации двуокиси азота превышали предельные концентрации в 2,75–4,5 раз, а допустимые максимально разовые концентрации – в 1,3–2,1 раза. Определено, что резкие изменения в динамике модифицированных мер могут служить индикатором не только явной, но и скрытой опасной загрязненности атмосферы городов.

Ключевые слова: концентрация загрязнения воздуха, состояние атмосферы города, мера рекуррентности, рекуррентная диаграмма

1. Введение

Общая проблема загрязнения атмосферы, связанная с ухудшением качества воздуха, является на сегодняшний день не менее актуальной, чем гонка вооружения и борьба с глобальной террористической угрозой. Если с гонкой вооружения и терроризмом мировое сообщество в состоянии справиться самостоятельно, то загрязнение атмосферы несет человечеству угрозу тотального вымирания. Главная опасность состоит в том, что в результате загрязнения воздушной оболочки планеты меняется химический состав воздуха. Это приводит к существенному изменению условий обитания человека и живых организмов. Особое значение проблема загрязнения атмосферного воздуха имеет для городов, в которых сосредотачивается большая часть населения планеты. В настоящее время в 150 городах мира наблюдается превышение предельно допустимой концентрации вредных веществ в воздухе в 5 раз. Например, ежегодно атмосфера Украины загрязняется более 6 млн. тонн вредных веществ. Традиционно самыми «главными» загрязнителями являются промышленные предприятия. Однако увеличение автомобилей на дорогах приводит к дополнительному возрастанию вредных выбросов в атмосферу [1]. За последние несколько лет количество отработанных газов, поступающих в воздух на территории городов, выросло на 50–70 %. Пожары также приводят к загрязнению атмосферы [2]. При этом ландшафтные пожары [3] и пожары на объектах нефтегазовой промышленности [4] обычно приводят к экологическим катастрофам. Химическое загрязнение воздуха в глобальном масштабе приводит к появлению кислотных дождей и парниковому эффекту, которые существенно ограничивают возможности использования сельскохозяйственных угодий, а также ухудшают качество воды [5].

Изучение специфических особенностей состояния атмосферного воздуха современных городов требует комплексного подхода, учитывающего различные аспекты. Так, например, комплексное изучение динамики концентраций загрязняющих веществ в атмосфере (ДЗА) городов позволяет выявлять ряд важных причинно-следственных взаимодействий, связанных с возможным появлением различных опасных (чрезвычайных) событий. Несмотря на реализуемые методы контроля загрязнений, качество атмосферного воздуха в городах с каждым годом только ухудшается. Большинство используемых методов контроля загрязнений атмосферного воздуха в городах разрабатывались более 30 лет назад без учета особенностей современных процессов образования атмосферных загрязнений в городах, а также существующих метрических возможностей контроля. При этом важной и нерешенной остается проблема выявления опасных загрязнений атмосферного воздуха в современных городах с учетом возможностей новых технологий.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Атмосфера современных городов представляет собой сложную экосистему, демонстрирующую диссипативность структуры, нелинейную динамику и самоорганизацию. В таких системах традиционные методы анализа могут не обнаруживать имеющиеся скрытые особенности ДЗА, связанные с возможным

появлением локальных чрезвычайных событий, поскольку базируются на принципах линейности, которые обычно нарушаются в реальных условиях [6]. Применение таких методов в данных условиях будут приводить к некорректному представлению реальной ДЗА в городских экосистемах. В этой связи активной областью исследований становятся методы количественной оценки нелинейной динамики в условиях воздействия шумов и нестационарности при коротких рядах данных наблюдения [7].

Процессы нестационарного загрязнения газовой среды с учетом шумов рассматриваются в [8]. Экспериментальные исследования выполнялись для локальной экосистемы в виде газовой среды в негерметичном помещении, в которой производился поджог горючего материала. Особенности загрязнения городской атмосферы, которая представляет собой открытую систему для вредных выбросов, не рассматриваются. При этом акцент делается на изучении флуктуаций параметров газовой среды с помощью сенсоров угарного газа, температуры и дыма. В [9] рассматривается применение метода частотно-временного анализа для временной локализации загрязнений газовой среды. При этом полученные результаты частотно-временного анализа касаются только ранних возгораний в помещениях. Применение этого метода частотно-временного представления для анализа загрязнения атмосферы является затруднительным. Для анализа особенностей ДЗА городов и выявления опасных состояний могут применяться известные нелинейные методы корреляционной размерности, Ляпунова и энтропии [10]. Однако указанные методы базируются на достаточно длинных реализациях данных и не могут непосредственно применяться в реальном темпе получения данных для временной локализации опасных событий, связанных с загрязнением атмосферного воздуха. Это означает, что известные методы обладают низкой оперативностью и кроме этого оказываются достаточно сложными в реализации. Для анализа загрязнений городской атмосферы, представляющей собой сложную динамическую экосистему, лучше всего использовать современные нелинейные подходы. Такие подходы не зависят от заданных статистических распределений данных наблюдения и применимы для коротких выборок данных, маскируемых естественными шумами, переходными процессами и различными артефактами. Сегодня лишь анализ, базирующийся на рекуррентности (условной повторяемости) состояний сложных динамических систем, соответствует указанным выше требованиям [11].

Рекуррентное поведение состояний динамических систем принято отображать в виде рекуррентных диаграмм (RP). Современное состояние методов качественного и количественного анализа RP и их применения представлено в [7]. RP представляют собой группу методов анализа, применяемых для визуализации траекторий сложных динамических систем в фазовом пространстве ограниченной размерности. Основным достоинством RP является то, что они позволяют судить об особенностях процессов, протекающих в сложных динамических системах, при наличии и влиянии шумов, дрейфе, рекуррентности и замираний состояний, совершении экстремальных событий, скрытой периодичности и цикличности. Методы количественного анализа RP ставят в соответствие RP

некоторые численные меры, основанные на плотности рекуррентности точек. При этом следует заметить, что до настоящего времени не создано удовлетворительной теории количественных мер RP и их применения. Поэтому применение указанного подхода к анализу загрязнения атмосферного воздуха городов нуждается в дополнительных исследованиях, обусловленных не только сложностью и разнообразием динамики состояний загрязненной атмосферы городских экосистем, но и рядом ограничений их мониторинга.

В этой связи в последнее время активно развиваются приложения методов теории динамических систем к анализу различных экосистем. Так, например, изучению RP концентрации угарного газа в газовой среде помещения при пожаре посвящена работа [12]. Анализ геофизических систем с позиции теории динамических систем и фрактальных множеств исследовано в [13]. Результаты исследования корреляционной размерности состояния газообразной среды в негерметичном помещении представлены в [14]. Указанные работы посвящены различным частным приложениям методов теории динамических систем и фрактальных множеств, которые отличаются от приложений, связанных с анализом атмосферных загрязнений городов и не могут быть непосредственно применены к решению рассматриваемой задачи.

Следует заметить, что глубина понимания процессов, лежащих в основе динамики состояний атмосферных загрязнений в современных городских экосистемах, тесно связана с прогрессом в анализе сложных динамических систем. В настоящее время для изучения и количественного описания топологии фазового пространства и динамических особенностей различных сложных систем широко используются фрактальные свойства [15], информационные меры и другие типы мер [16]. При этом особое внимание уделяется изучению динамики сложных систем на основе использования различных мер рекуррентности состояний (PC), отображаемых RP [17].

В указанных публикациях отмечается, что свойство PC характерно для большинства реальных динамических систем и процессов в не зависимости от их природы.

Таким образом, RP являются одним из современных и конструктивных методов изучения особенностей динамики сложных систем и выявления паттернов по данным реальных наблюдений. В сочетании с методами количественного анализа рекуррентности RP позволяют характеризовать и выявлять структурные особенности динамики состояний сложных систем, которые не могут быть выявлены с использованием классических методов. Это означает, что современный анализ атмосферных загрязнений должен производиться на основе изучения RP и PC концентрации загрязнений воздушного бассейна городов, базирующихся на соответствующих мерах. Однако известные в литературе меры PC динамических систем остаются достаточно сложными и не в полной мере позволяют изучать особенности ДЗА и оперативно выявлять опасные события, связанные с возможным появлением чрезвычайных экологических ситуаций в городе. Поэтому важной и нерешенной частью проблемы анализа загрязнений воздуха в современных городах является развитие мер рекуррентности для оперативного выявления загрязнений атмосферы.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка метода оперативного выявления чрезвычайных событий, связанных с загрязненностью атмосферы городов, на основе мер рекуррентности концентраций загрязнения атмосферного воздуха.

Для достижения цели работы были поставлены задачи:

- разработать меры рекуррентности состояний для концентраций загрязнений атмосферного воздуха, позволяющие оперативно (в реальном времени наблюдения) выявлять опасные события в состоянии воздушного бассейна городов;

- экспериментально исследовать применимость разработанных мер рекуррентности для оперативного выявления опасных событий, связанных с загрязненностью воздушного бассейна городов, на примере реальных измерений концентрации одного из характерных газовых загрязнителей атмосферы городов.

4. Разработка мер рекуррентности состояний для концентраций загрязнений атмосферного воздуха городов

Под состоянием атмосферного воздуха города в фазовом пространстве будем понимать либо наблюдаемые, либо ненаблюдаемые, но восстановленные по одному наблюдаемому параметру [17], системные переменные в виде концентраций соответствующих загрязнений. В практике мониторинга атмосферных загрязнений городов обычно отсутствуют сведения о возмущениях и единственной исходной информацией являются результаты измерений концентрации загрязнений. Обычно измерения производятся в заданные дискретные моменты времени. Этой информации оказывается достаточно для анализа динамики состояния атмосферного воздуха в заданной области контроля на территории города. В общем случае измерительная информация, поступающая в дискретный момент времени i контроля, может быть представлена m -мерным вектором данных

$$\bar{z}_i = \bar{d}_i + \bar{\Delta}_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N_s - 1, \quad (1)$$

где $\bar{d}_i$ – вектор истинной концентрации загрязнений, характеризующий текущее состояние загрязнений городской атмосферы в области контроля; $\bar{\Delta}_i$ – вектор текущих возмущений концентрации загрязнений; N_s – максимальное число результатов измерения вектора концентраций загрязнений (размер выборки данных). Размер m вектора данных (1) может быть произвольным, но конечным, и определяться либо количеством контролируемых загрязнителей атмосферного воздуха, либо размером восстанавливаемого фазового вектора для одного контролируемого загрязнителя.

Применение метода RP [6] к данным (1) сводится к вычислению величины

$$R_{i,j}^{m,\varepsilon} = \Theta\left(\varepsilon - \|\bar{z}_i - \bar{z}_j\|\right)^\infty, \quad \bar{z}_i \in \Omega^m, \quad i, j = 1, 2, \dots, N_s, \quad (2)$$

где $\Theta(*)$ – функция Хевисайда; ε – размер окрестности для вектора $\bar{z}_i$ концентраций загрязнений в момент времени i , а $\|\cdot\|$ – знак определения нормы соответствующего вектора. Это означает, что метод РР позволяет отображать траектории в m -мерном фазовом пространстве загрязнений (1) на двумерную двоичную матрицу размером $N_s \times N_s$. При этом элемент матрицы, равный единице при некоторых моментах времени i и j , будет соответствовать РС концентраций загрязнений атмосферы. В этом случае координатные оси РР будут определяться соответствующими осями дискретного времени регистрации данных. Изучение динамики состояний различных сложных систем на основе представления (2) стало популярным благодаря появлению различных методов количественного анализа РС [7]. Данные методы основываются на соответствующих мерах для измерения сложностей в РР, отображающих особые состояния исследуемых динамических систем. Однако большинство известных мер не позволяют их использовать для анализа ДЗА. В ряде случаев известные меры оказываются недостаточно оперативными и малочувствительными к динамике вектора концентраций загрязнений для характеристики на их основе появления опасных событий. Это существенно ограничивает их возможности для анализа ДЗА с целью выявления опасности, обуславливаемой атмосферными загрязнениями в зоне контроля.

Наиболее известной и широко применяемой является мера РС, определяемая для представления (2), величиной

$$R_0(\varepsilon) = \frac{1}{N_s^2} \sum_{i \neq j}^{N_s} R_{i,j}^{m,\varepsilon}. \quad (3)$$

Мера РС (3) позволяет рассчитывать плотность РС концентраций загрязнений атмосферы без учета линии идентичности в (2). В пределе при $N_s \rightarrow \infty$ мера (3) будет определять вероятность РС концентраций атмосферных загрязнений в исследуемой зоне контроля города. Основным ограничением данной меры является то, что она обладает кумулятивными свойствами и в этой связи не позволяет использовать ее для анализа динамики загрязнений атмосферы городов с целью оперативного выявления ее опасных состояний. Поэтому вместо меры (3) с учетом представления (2) предлагается использовать меру, определяемую функционалом, зависящим от величины окрестности ε и текущего момента времени i измерения, т. е.

$$M_1(\varepsilon, i) = \frac{1}{i+1} \sum_{k=0}^i R_{i,k}^{m,\varepsilon}, \quad i = 1, 2, \dots, N_s. \quad (4)$$

Модификация меры (4), в отличие от меры (3), позволяет анализировать плотность РС концентраций загрязнений для каждого текущего момента времени i с учетом размера окрестности ε . Поэтому мера (4) может использоваться для анализа РС вектора концентраций для заданного числа загрязнений в атмо-

сфере в контролируемой городской зоне в реальном времени. При этом следует заметить, что мера (4) с увеличением времени i наблюдения данных снижает чувствительность к ДЗА из-за проявления ее кумулятивных свойств. Кроме этого мера (4) на начальном этапе регистрации данных обладает недостаточной точностью. Поэтому мера (4) обладает ограниченными возможностями при анализе ДЗА и временной локализации опасных ее состояний. С целью устранения указанных ограничений предлагается модификация меры (4) в виде оконной меры с движущимся окном размера a вдоль оси времени наблюдения. Для произвольного момента i времени наблюдения данных указанная оконная мера определяется величиной

$$M_2(i, a, \varepsilon) = \text{if} \left(i < a, \frac{1}{i+1} \sum_{k=0}^i R_{i,k}^{m,\varepsilon}, \frac{1}{a} \sum_{k=0}^{a-1} R_{i,i-k}^{m,\varepsilon} \right). \quad (5)$$

Мера (5) позволяет анализировать динамику плотности РС вектора концентраций для произвольного числа загрязнений в атмосфере в контролируемой городской зоне концентраций загрязнений атмосферы для текущего момента времени i с учетом размера окрестности ε при заданном размере a движущегося окна. Следуя (5), мера является параметрическим функционалом двух параметров ε и a , величина которых выбирается исходя из требуемого качества анализа ДЗА с целью наилучшего выявления опасных ее состояний. В отличие от меры (4), предлагаемая мера (5) позволяет анализировать особенности динамики РС для вектора концентраций заданного числа загрязнений в атмосфере в контролируемой городской зоне в реальном времени. Мера (5) является усредненной в окне размера a при заданной величине окрестности ε . Это означает, что с помощью меры (5) возможно анализировать динамику плотности РС вектора концентраций для произвольного числа загрязнителей атмосферы в реальном времени и на ее основе выявлять опасные события. Поэтому данная мера может быть положена в основу метода оперативного выявления опасностей, связанных с загрязненностью атмосферы городов. При этом динамика плотности РС вектора концентраций загрязнений численно характеризует степень повторяемости различных состояний вектора концентраций, исследуемых атмосферных загрязнений, для текущего момента времени в заданных городских зонах.

В связи с этим указанная мера позволяет локализовать во времени важные на практике динамические состояния, связанные с опасными событиями, характеризующимися, например, ламинарностью динамики концентраций атмосферных загрязнений (отсутствию турбулентности и рассеивания загрязнений). Ламинарность динамики означает, что концентрация загрязнений атмосферного воздуха в контролируемой городской зоне не изменяется или изменяется незначительно. С помощью данной меры также возможно выявлять важные переходы от хаотических состояний вектора концентраций загрязнений в атмосферном воздухе к случайным состояниям и наоборот. При этом переход от случайных состояний к хаотическим состояниям сопровождается ростом концентраций

загрязнений в атмосферном воздухе в контролируемой городской зоне. Обратный переход от хаотических состояний к случайным состояниям свидетельствует о потере динамической устойчивости вектора концентраций загрязнений в атмосферном воздухе. При этом следует заметить, что предложенные меры РС вектора концентраций загрязнений атмосферного воздуха остаются справедливыми при любой размерности вектора $\bar{z}_i$. При этом в частном случае рассмотрения одного типа загрязнения вектор $\bar{z}_i$ будет вырождаться в скаляр.

5. Методика экспериментальных исследований применимости разработанных мер рекуррентности для концентраций загрязнений атмосферного воздуха

Проверка применимости разработанных мер РС концентраций атмосферных загрязнений городов производилась по экспериментальным измерениям на трех маршрутных постах для типовой городской конфигурации с наличием загрязнений от стационарных и мобильных источников. В качестве типовой рассматривалась городская конфигурация, для которой средний уровень индекса загрязненности атмосферы составлял порядка 6,8 ед. Такой индекс загрязненности атмосферы характерен для большинства городов мира.

Измерения концентраций газовых загрязнений атмосферы выполнялись с помощью портативного газоанализатора DRÄGER PAC 7000 (Германия). Газоанализатор построен на основе современных сенсоров Dräger XXS. Обеспечивает короткое время отклика (до 20 с) и надежность результатов измерений. Прибор способен измерять концентрации H_2S , O_2 , CO , CO_2 , Cl_2 , HCN , NH_3 , NO_2 , NO , PH_3 , SO_2 и других газов. Концентрации газовых загрязнений измерялись в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.3.01-86 «Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов».

В ходе исследований учитывалась современная стратегия многих стран, связанная с тенденцией контроля ограниченного набора важнейших загрязнителей атмосферы, которые нередко являются индикаторами для более широкого спектра загрязняющих веществ, входящих в состав выбросов. К таким важнейшим загрязнителям относят: взвешенные вещества (PM_{10} и $PM_{2.5}$), оксиды азота (NO_x), оксиды серы SO_2 и озон (O_3). Следуя современной стратегии, контроль взвешенных веществ обычно связан с обязательным наблюдением концентраций таких газообразных загрязнителей, как NO , NO_2 , SO_2 , CO . При этом отмечается, что мониторинг концентраций O_3 связан с контролем концентраций NO , NO_2 и $NMVOС$ (летучих органических соединений не метанового ряда). Учитывая особую опасность для человека и окружающей среды, в качестве основного загрязнителя атмосферы городов при экспериментальной проверке предложенных мер рассматривался NO_2 .

Эксперимент проводился в течение месяца (31 день). Измерялись концентрации NO_2 в трех местах (А, В и С) типовой городской конфигурации. Координаты мест измерения позиционировались с использованием GPS (А: 49.446361, 32.053106; В: 49.407947, 32.093376; С: 49.421643, 32.021621). Концентрации двуокиси азота в трех местах измерялась в $мг/м^3$. Измерения concentra-

ции двуокиси азота в местах А, В и С производились 4 раза в сутки (01:00, 07:00, 13:00, 19:00). В эксперименте условному дискретному моменту времени $i=0$ соответствовало реальное время измерения 01:00 первого дня эксперимента. При этом условному моменту времени $i=120$ соответствовало время 01:00 31-го дня эксперимента. Для экспериментальной проверки возможности использования предложенных мер РС концентрации двуокиси азота для оперативного (в темпе наблюдения данных) выявления опасных событий, связанных с загрязнением атмосферного воздуха в зонах указанных мест контроля выбирался базовый временной интервал. Указанный интервал определялся с 01:00 4-го дня ($i=12$) по 01:00 13-го дня ($i=48$) эксперимента.

6. Результаты экспериментальной проверки использования предложенных мер рекуррентности состояний для оперативного выявления опасных загрязнений атмосферы

Исходными данными для экспериментальной проверки являлись результаты измерений прибором RÄGER PAC 7000 значений концентрации двуокиси азота в пунктах контроля А, В и С в течение 31 дня, а также ПДК=0,04 в мг/м^3 . Измерения проводились 4 раза в сутки. При этом в течение некоторых суток указанные измерения не проводились. Это было связано с организационными мероприятиями. Полученные результаты измерений по пунктам контроля иллюстрируются на рис. 1. С целью сохранения равномерности шкалы отсчетов (временной шкалы измерений) значения концентрации двуокиси азота в пунктах контроля, которые не измерялись в течение определенных суток, принимались за нулевые значения (ниже фонового уровня). В дальнейшем это позволило их исключить из рассмотрения.

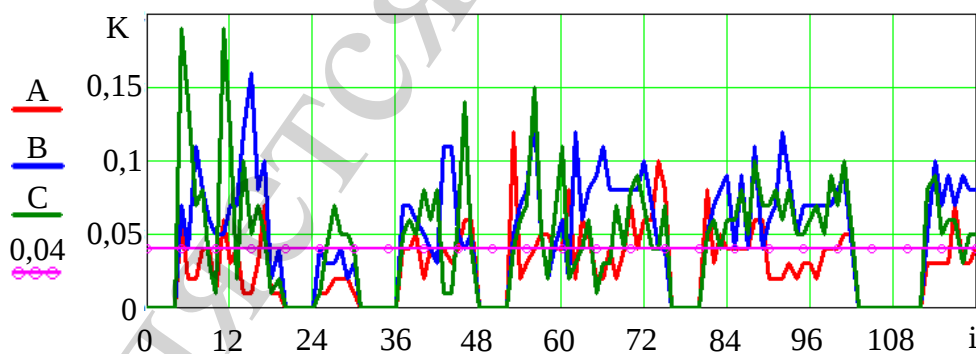


Рис. 1. Значения измеренной концентрации (мг/м^3) NO_2 в атмосферном воздухе типовой городской конфигурации в местах контроля А, В, С

Анализ измерений концентрации NO_2 в атмосферном воздухе типовой городской конфигурации в заданных местах контроля (рис. 1) свидетельствует о том, что возможная скрытая опасность загрязнения может иметь место между 24 и 30 отсчетами. Поэтому данный интервал будем рассматривать ниже в качестве тестового для проверки предлагаемого метода.

В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены рекуррентные графики (2) в виде кластеров черных и белых точек для измеренных в ходе эксперимента

концентраций двуокиси азота в атмосферном воздухе (рис. 1) при заданном размере окрестности $\varepsilon=0,01$.

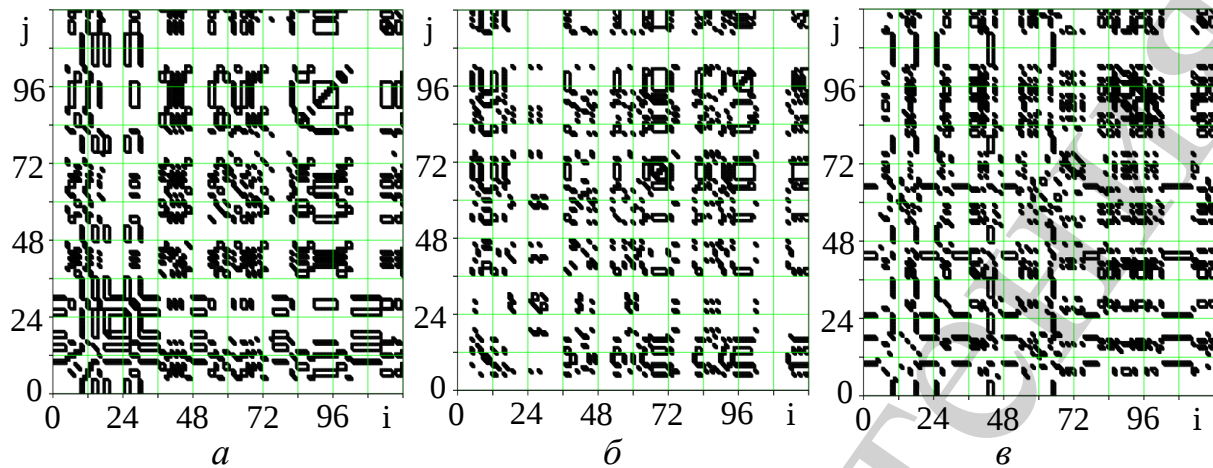


Рис. 2. Рекуррентные графики (2) для концентрации NO_2 в атмосферном воздухе типовой городской конфигурации в местах контроля: *a* – А; *б* – В; *в* – С

Динамика предложенной меры M_1 РС для концентрации двуокиси азота в атмосферном воздухе в трех пунктах контроля иллюстрируется на рис. 3. При этом сплошные кривые соответствуют размеру окрестности $\varepsilon=0,01$, а точечные – $\varepsilon=0,001$.

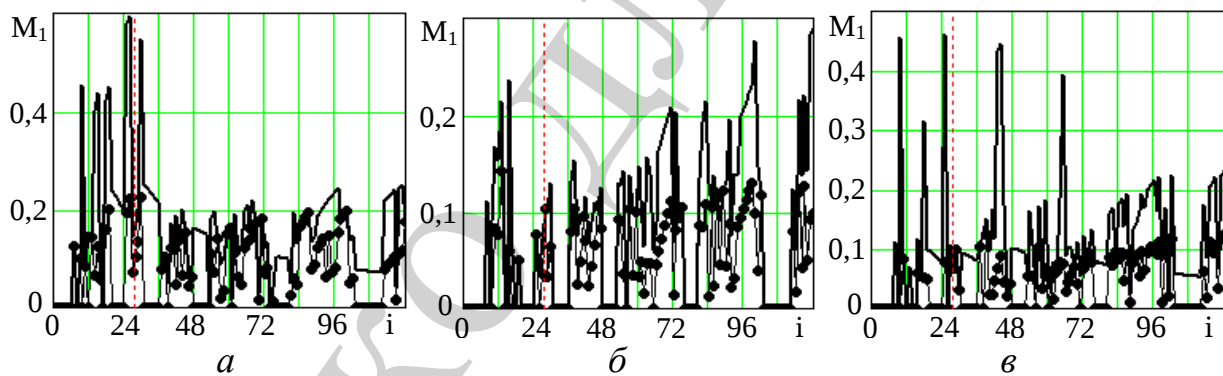


Рис. 3. Динамика меры M_1 РС для концентрации NO_2 в атмосферном воздухе в местах контроля: *a* – А; *б* – В; *в* – С

Аналогичные зависимости для меры M_2 РС для концентрации двуокиси азота в атмосферном воздухе в трех точках контроля при использовании движущегося усредняющего окна размером 12 отсчетов представлены на рис. 4.

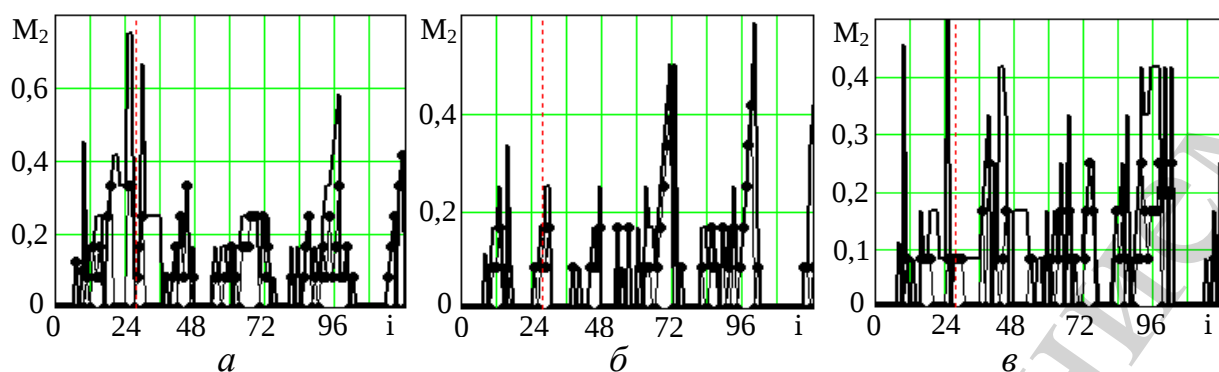


Рис. 4. Динамика меры M_2 РС для концентрации NO_2 в атмосферном воздухе в местах контроля: a – А; b – В; v – С

На рис. 5 представлены гистограммы экспериментально измеренных концентраций двуокиси азота в атмосферном воздухе. Здесь через K обозначены концентрации двуокиси азота в мг/м^3 , а через N – число соответствующих значений концентрации в местах контроля. На гистограммах также отмечены ПДК и максимально разовая предельная концентрация $0,085 \text{ мг/м}^3$ для измеряемого загрязнения – NO_2 .

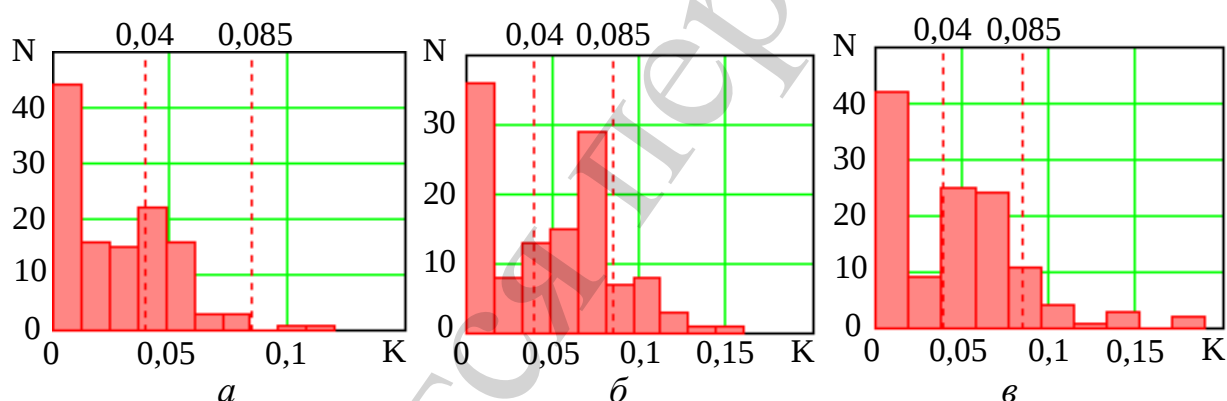


Рис. 5. Гистограммы концентраций NO_2 в атмосферном воздухе для мест контроля: a – А; b – В; v – С

Для сравнения на рис. 6 представлены динамика предложенных мер M_1 и M_2 РС для концентрации NO_2 при размере окрестности $\epsilon=0,01$, а также динамика измеренной концентрации NO_2 в атмосферном воздухе K для заданных мест контроля и ПДК для NO_2 в мг/м^3 .

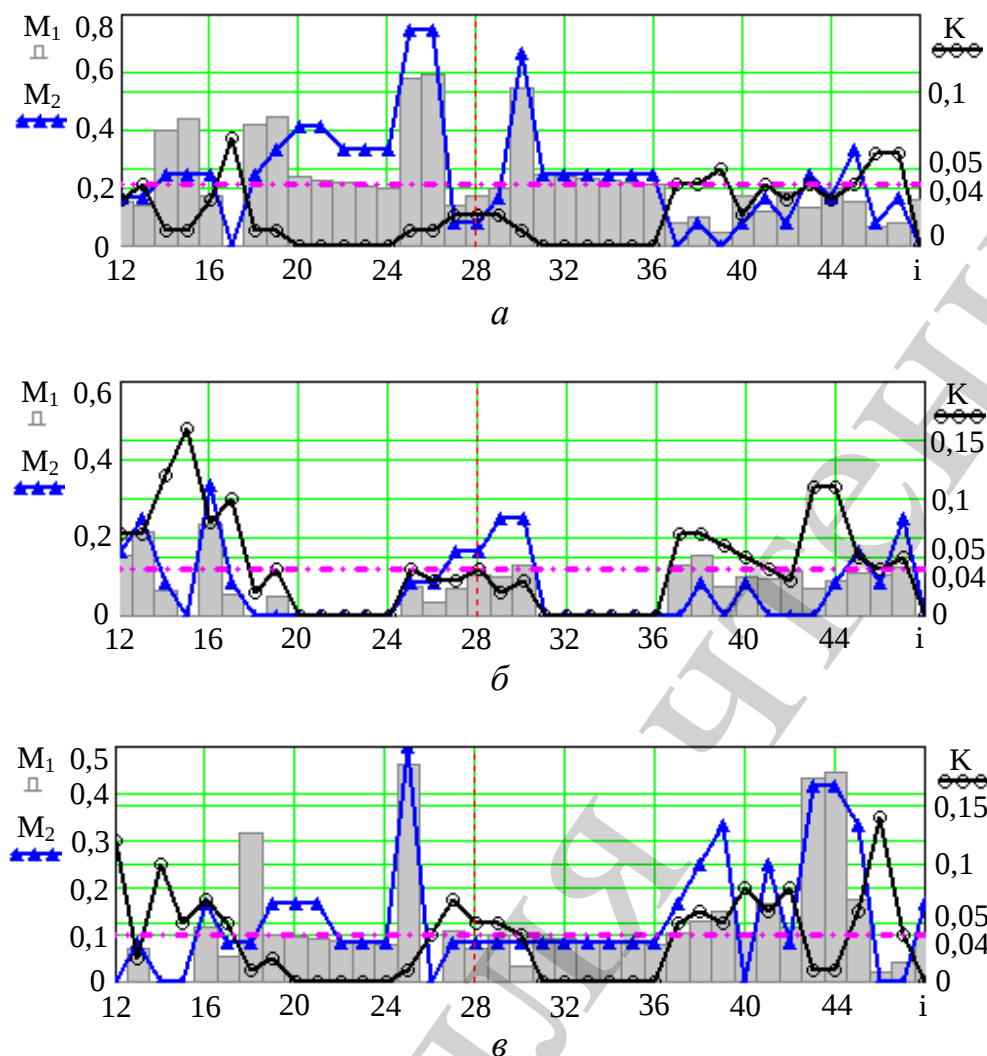


Рис. 6. Сравнительная динамика мер M_1 и M_2 РС для концентрации NO_2 в атмосферном воздухе, а также динамика измеренной концентрации NO_2 и величина ПДК для заданных мест контроля: a – А; $б$ – В; $в$ – С

На рис. 6 дополнительно отмечен условный отсчет под номером $i=28$, соответствующий реальному времени 01:00 8-го дня эксперимента.

7. Обсуждение результатов исследования предложенных мер рекуррентности для концентрации атмосферного загрязнения городов

Анализ RP на рис. 2 показал, что динамика состояния концентрации двуокиси азота в атмосферном воздухе типовой городской конфигурации в целом оказывается не случайной, а хаотической. Это означает, что реальная динамика концентрации NO_2 в атмосферном воздухе имеет фрактальную структуру. При этом фрактальная структура динамики концентрации NO_2 в атмосферном воздухе в ходе эксперимента оказывается неодинаковой для рассматриваемых маршрутных постов и характеризуется различной топологией и текстурой РС. Для нее, прежде всего, характерны элементы периодической и экстремальных топологий с резкими изменениями в динамике концентрации NO_2 в воздухе. RP упрощает выявление экстремальных и редких событий, связанных с за-

грязнением атмосферы. Анализ РР позволяет выявлять мелкомасштабные структуры, составленные из простых точек, диагональных, горизонтальных и вертикальных линий (рис. 2, а–в). Комбинации вертикальных и горизонтальных линий формируют прямоугольные кластеры рекуррентных точек. Вертикальные и горизонтальные линии, определяемые (2) на рис. 2, выделяют промежутки времени, в которые концентрация двуокиси азота в атмосферном воздухе не изменяется или изменяется незначительно (атмосферные загрязнения в виде концентрации NO_2 как бы «замораживаются» в эти промежутки времени). Это является типичным поведением при ламинарных состояниях. В таких состояниях отсутствует перемешивание между соседними слоями воздуха и соответственно замедляется или отсутствует рассеивание загрязнителя в атмосфере, что приводит к сохранению или увеличению загрязненности. Указанные состояния являются индикаторами возможных скрытых опасностей загрязненности атмосферы.

При этом наличие нерегулярных черных и белых кластеров РР (рис. 2) свидетельствует о нерегулярности ДЗА двуокисью азота, которая может быть, обусловлена наличием корреляций. В наибольшей степени такое состояние характерно для места контроля А в интервале, определяемом 12–36 отсчетами.

Анализ динамики меры M_1 РС для концентрации двуокиси азота в атмосферном воздухе в заданных местах контроля (рис. 3) свидетельствует о максимальной величине данной меры на интервале 12–36 отсчет для мест контроля А и С, равной 0,6 и 0,48 соответственно. Аналогичная ситуация наблюдается и для меры M_2 (рис. 4). В этом случае максимальная величина меры РС составляет величину 0,78 и 0,5 для мест контроля А и С соответственно. При этом в месте контроля В значение меры РС для концентрации загрязнения NO_2 в указанном интервале не превышает 0,3. Достаточно высокое значение меры РС для концентраций загрязнения атмосферы NO_2 в местах контроля А и С свидетельствует о наличии значительной корреляции концентраций загрязнения. Малое значение меры РС для концентрации NO_2 в месте контроля В означает меньшую корреляцию концентраций загрязнения. Анализ представленных на рис. 5 гистограмм показал, что во всех пунктах контроля текущие значения концентраций NO_2 превышали ПДК от 2,75 до 4,5 раз. При этом допустимые максимально разовые концентрации были превышены в 1,3–2,1 раза. В ходе эксперимента установлено, что распределение концентраций загрязнений на исследуемом интервале оказывается негауссовым (рис. 5). В этой связи использование средних значений концентраций загрязнений за месяц для сравнения с ПДК является не совсем корректным.

Сравнительная динамика предложенных мер M_1 , M_2 РС для измеренной концентрации NO_2 в атмосферном воздухе (рис. 6) в местах контроля показывает, что перед 28 отсчетом имело место высокое значение (0,6; 0,78 и 0,48; 0,5) мер РС для мест контроля А и С соответственно, которое затем резко уменьшалось. При этом указанные меры для пункта контроля С принимали нулевые значения в момент 26 отсчета. Для пункта контроля А имело место отличное от нулевых значений (близкое к 0,1) указанных мер, которое соответствовало 28 отсчету. Такая динамика мер РС для концентрации загрязнения объясняется

резким переходом от ламинарного состояния загрязнения NO_2 (высокое значение РС) к состоянию, связанному с потерей этого состояния и переходу в неустойчивое состояние (низкое значение РС). Такой переход состояний может представлять определенную опасность для загрязненности атмосферного воздуха. При этом следует заметить, что с точки зрения временной локализации опасных событий по резкому снижению предложенных мер РС лучше использовать меру M_2 , которая обладает большими возможностями по выявлению указанных опасностей загрязненности атмосферы.

8. Выводы

1. Разработан метод оперативного выявления опасной загрязненности атмосферы городов с использованием вычисления мер рекуррентности (повторяемости) состояний для вектора концентраций загрязнений. Новый научный результат состоит в модификации известных мер рекуррентности, направленной на повышение их оперативности с целью возможности использования в реальном темпе измерения. Отличительная особенность модифицированных мер состоит в усреднении текущей рекуррентности состояний концентрации атмосферных загрязнений в динамических окнах. При этом динамические окна имеют нарастающую в реальном времени измерений ширину и фиксированную ширину движущегося окна. Предложенные меры остаются справедливыми, как в случае одного, так и группы анализируемых загрязнений. Важной особенностью указанных мер является комплексный учет явных и скрытых дестабилизирующих факторов, влияющих на текущую концентрацию загрязнений в пункте контроля. При этом не требуется учет традиционных метеорологических и других условий при выявлении опасных загрязненностей атмосферы городов. Разработанный метод позволяет оперативно выявлять не только явные, но и скрытые опасные загрязнения воздушного бассейна городов и повышать тем самым результативность и своевременность мероприятий по недопущению загрязнений атмосферы с целью защиты населения и окружающей среды.

2. Экспериментально установлено, что динамика концентрации двуокиси азота в атмосферном воздухе для типовой городской конфигурации в течение исследуемого месяца имеет фрактальную структуру. При этом фрактальная структура оказывается неодинаковой для различных пунктов контроля и характеризуется наличием элементов периодической и экстремальных топологий с резкими изменениями динамики. Указанные особенности позволяют выявлять скрытые опасности загрязненности атмосферы. Динамика предложенных мер РС на интервале наблюдения меняется от нуля до 0,78. Показано, что в эксперименте максимальные значения мер РС соответствуют интервалу наблюдения, определяемому 12–36 отсчетами в пунктах контроля А и С. Установлено, что в рассматриваемых пунктах контроля текущие значения концентраций NO_2 превышали ПДК от 2,75 до 4,5 раз, а допустимые максимально разовые концентрации – в 1,3–2,1 раза. При этом распределение концентраций загрязнений на исследуемом интервале оказывается негауссовым. Отмечается, что использование средних значений концентрации загрязнений за месяц для сравнения их с ПДК является не совсем корректным. Установлено, что резкое изменение в динамике

мер РС от их высоких значений к низким значениям и обратно может использоваться как индикатор скрытой опасности загрязнения атмосферного воздуха городов. Отмечается, что с точки зрения временной локализации опасности загрязнения лучше использовать меру M_2 , обладающую большими локализирующими возможностями.

Литература

1. Mathematical model of the efficiency of diesel particulate matter filter / Kondratenko O. M., Vambol S. O., Stokov O. P., Avramenko A. M. // Scientific Bulletin of National Mining University. 2015. Issue 6. P. 55–61.
2. Vasiliev M. I., Movchan I. O., Koval O. M. Diminishing of ecological risk via optimization of fire-extinguishing system projects in timber-yards // Scientific Bulletin of National Mining University. 2014. Issue 5. P. 106–113.
3. Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge / Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, Issue 10 (90). P. 11–16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.114504>
4. The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out / Semko A., Rusanova O., Kazak O., Beskrovnaya M., Vinogradov S., Gricina I. // The International Journal of Multiphysics. 2015. Vol. 9, Issue 1. P. 9–20. doi: <https://doi.org/10.1260/1750-9548.9.1.9>
5. Vasyukov A., Loboichenko V., Bushtec S. Identification of bottled natural waters by using direct conductometry // Ecology, Environment and Conservation. 2016. Vol. 22, Issue 3. P. 1171–1176.
6. Finding Trends of Airborne Harmful Pollutants by Using Recurrence Quantification Analysis / Aceves-Fernandez M. A., Ramos-Arreguín J. M., Pedraza-Ortega J. C., Sotomayor-Olmedo A., Tovar-Arriaga S. // American Journal of Environmental Engineering. 2012. Vol. 1, Issue 1. P. 10–14. doi: <https://doi.org/10.5923/j.ajee.20110101.02>
7. Recurrence Plots and Their Quantifications: Expanding Horizons / C. L. Webber, C. Ioana, N. Marwan (Eds.) // Springer Proceedings in Physics. 2016. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29922-8>
8. Experimental study of the fluctuations of gas medium parameters as early signs of fire / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Popov V., Romin A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, Issue 10 (91). P. 50–55. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122419>
9. Development of the method of frequency-temporal representation of fluctuations of gaseous medium parameters at fire / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Popov V., Semkiv O. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2, Issue 10 (92). P. 44–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125926>
10. Федотов В. Х., Кольцов Н. И. Модели хаотической динамики. Часть 8. Энтропийные инварианты // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18, № 2. С. 330–335.

11. Marwan N. How to avoid potential pitfalls in recurrence plot based data analysis // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2011. Vol. 21, Issue 4. P. 1003–1017. doi: <https://doi.org/10.1142/s0218127411029008>
12. Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleshchenko R., Borodych P. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3, Issue 9 (93). P. 34–40. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133127>
13. Earthquakes: Recurrence and Interoccurrence Times / Abaimov S. G., Turcotte D. L., Shcherbakov R., Rundle J. B., Yakovlev G., Goltz C., Newman W. I. // *Earthquakes: Simulations, Sources and Tsunamis*. 2008. P. 777–795. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8757-0_20
14. Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleshchenko R., Gornostal S. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, Issue 10 (95). P. 25–30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142995>
15. Marwan N., Kurths J., Saparin P. Generalised recurrence plot analysis for spatial data // *Physics Letters A*. 2007. Vol. 360, Issue 4-5. P. 545–551. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2006.08.058>
16. Chen C.-B., Yang H., Kumara S. Recurrence network modeling and analysis of spatial data // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2018. Vol. 28, Issue 8. P. 085714. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5024917>
17. Introduction to focus issue: Recurrence quantification analysis for understanding complex systems / Marwan N., Webber C. L., Macau E. E. N., Viana R. L. // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2018. Vol. 28, Issue 8. P. 085601. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5050929>