

Использование функции неопределенности для выявления опасных состояний вектора атмосферных загрязнений

Б. Б. Поспелов, Е. А. Рыбка, Р. Г. Мелещенко, А. Н. Крайнюков,
С. В. Гарбуз, Ю. С. Безуглая, И. Е. Морозов, А. В. Куруч, Е. А. Салиенко,
Р. В. Васильченко

Розглянуто використання оцінки значень функції невизначеності щодо виявлення небезпечних станів для довільного вектора атмосферних забруднень. При цьому оцінку функції невизначеності пропонується проводити в рухомому по траєкторії вектора станів вікні фіксованої ширини. Це дозволяє не тільки виявляти моменти виникнення небезпечних станів атмосферних забруднень, але і одночасно визначати їх радіальну швидкість щодо поста контролю. Нульова радіальна швидкість небезпечних станів атмосферних забруднень дозволить виявляти поточні стани атмосфери, у яких відсутнє розсіювання забруднень у повітрі. Саме такі стани виявляються особливо небезпечними, оскільки призводять до накопичення забруднень та зростання їх концентрації в атмосфері. Верифікація можливості використання функції невизначеності щодо виявлення небезпечних станів вектора атмосферних забруднень проводилася на прикладі експериментальних даних. При цьому в якості небезпечних складових вектора станів атмосферних забруднень розглядалися: формальдегід, аміак і оксид вуглецю. Результати верифікації в цілому свідчать про можливість використання функції невизначеності для виявлення небезпечних станів вектора атмосферних забруднень. Встановлено, що використання функції невизначеності виявляється інваріантним по відношенню до нерегулярності реєстрації атмосферних забруднень на стаціонарних постах контролю. Показано, що застосування функції невизначеності забезпечує виявлення небезпечних станів, що характеризуються не тільки перевищенням граничних допустимих концентрацій, а також нульовою радіальною швидкістю їх переміщення щодо пункту контролю. Експериментально встановлено, що для виявлення небезпечних станів забруднення атмосфери протяжність вікна повина становити від 4 до 8 відліків реєстрації

Ключові слова: атмосферні забруднення, концентрація забруднень, функція невизначеності, радіальна швидкість, вектор стану

1. Введение

Сложившуюся в мире ситуацию с загрязнением атмосферы (ЗА) можно охарактеризовать как кризисную. Такая ситуация формировалась в течение достаточно длительного периода из-за пренебрежения объективными законами развития и воссоздания природно-ресурсного комплекса. Современная ситуация характеризуется масштабностью ЗА. Главным антропогенным источником ЗА являются крупные промышленные конгломераты, к числу которых относятся и

автотранспорт [1]. Пожары также приводят к загрязнению атмосферы [2]. При этом ландшафтные пожары [3] и пожары на объектах нефтегазовой промышленности [4] обычно приводят к экологическим катастрофам. При этом наиболее тяжелые формы проявления ЗА наблюдаются на промышленных площадках и прилегающих территориях. Именно здесь возникают наиболее высокие концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе, превышающие предельные допустимые концентрации (ПДК) в два-пять, а нередко и в более раз. В глобальном масштабе ЗА приводит к парниковому эффекту, появлению кислотных дождей [5] и загрязнению водоносных слоев [6]. В этой связи, особо острой становится проблема выявления опасных ЗА городов, в которых сосредоточена большая часть населения, транспорта и промышленности.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Влияние метеорологических условий на ЗА имеет сложный и неопределенный характер. Связи между уровнями концентраций ЗА и метеорологическими условиями для различных городов схожи. Это объясняется сходством структуры выбросов ЗА и характеристик городской инфраструктуры. Важность метеорологических условий состоит в том, что они способствуют накоплению или рассеиванию ЗА примесей в атмосферном воздухе. Метеорологическими параметрами условий, которые более всего влияют на ЗА, являются ветер (скорость и направление), температура воздуха, а также осадки и туманы. Для оценки состояния ЗА, выявления ее опасных состояний и последующего принятия управленческих решений на территории городов размещают сети постов контроля ЗА, позволяющие отслеживать динамику содержания вредных веществ. Изменение характерных для конкретной территории метеорологических условий способно усиливать неблагоприятное воздействие ЗА на организм человека. Так, увеличение числа температурных аномалий, штилевых явлений, инверсий температуры может в конечном итоге оказывать существенное влияние на показатели первичной заболеваемости, обострений и смертности. Это объясняется тем, что при подобных условиях происходит повышенное накопление в воздухе токсичных веществ (при одной и той же интенсивности ЗА).

Перенос и рассеивание ЗА представляет собой в общем случае достаточно сложную нелинейную систему. Принцип линейности для таких систем обычно не выполняется [7], что в свою очередь приводит к некорректному представлению реальных физических процессов ЗА. При этом выявление динамики опасных состояний ЗА имеет первостепенное значение для предотвращения их появления [8]. В этой связи активной областью исследований становятся методы нелинейной динамики [9]. Наиболее популярными для исследования различных сложных систем становятся методы, базирующиеся на корреляционной размерности, показателях Ляпунова и энтропии [10]. Однако применение указанных методов основывается на достаточно продолжительных рядах данных наблюдений, которые для реальных природных систем не всегда удается получить. Некорректное применение таких методов, особенно к природным системам, часто приводит к ложным результатам [11]. Чтобы успешно исследовать сложную систему, как ЗА, лучше использовать нелинейный инструментарий, который не зависит от априорных стати-

стических распределений данных, позволяет использовать короткий набор данных с учетом шумов, переходных процессов и артефактов [12]. Такой инструмент базируется на фундаментальном свойстве диссипативных динамических систем – рекуррентности состояний. Это свойство выражается в том, что даже самое малое возмущение системе, вызывающее экспоненциальное возрастание ее состояния, через некоторое время стремится вернуться к состоянию, близкому к предыдущему, имея при этом подобную динамику. Такое рекуррентное поведение сложных систем предложено отображать в виде соответствующих рекуррентных диаграмм (RP) [13]. Методы, основанные на RP, были успешно применены к исследованию различных биологических систем [14], а также в науках о Земле [15]. Однако указанные методы нуждаются в дополнительных исследованиях с учетом особенностей экологического мониторинга [8]. Следует заметить, что в настоящее время активно развиваются приложения методов теории детерминированных и стохастических динамических систем к анализу различных экосистем, в том числе и ЗА [16, 17]. При этом исследуемая модель описывается системой детерминированных или стохастических дифференциальных уравнений, и чем сложнее система, тем больше уравнений необходимо использовать для ее адекватного описания. В частности, различные системы могут анализироваться с позиции теории динамических систем и фрактальных множеств [17]. Например, экспериментальное изучение динамики состояния загрязнения воздушной среды опасными факторами пожара в помещении выполнено в [18]. В [18, 19] экспериментально подтверждено, что динамика состояний ЗА является сложной и нестационарной. В условиях нестационарной динамики состояний загрязнения воздушной среды при возгораниях предлагается повышать быстродействие сенсоров контроля. Решению этой задачи посвящена работа [20]. Для преодоления априорной неопределенности динамики состояний загрязнения воздушной среды в помещении предлагается использовать самонастраивающиеся сенсоры [21]. В [22] анализируется только динамика самонастройки порога и вероятности выявления опасных событий сенсорами. При этом анализ возможности использования свойства рекуррентности состояний загрязнения воздушной среды не рассматривается. Анализу корреляционной размерности состояния воздушной среды при раннем воспламенении материалов посвящена работа [23]. Однако возможности применения функции неопределенности (ФН) для выявления опасных состояний ЗА не изучаются. Работа [24] посвящена экспериментальному исследованию временных автокорреляций для основных опасных ЗА при возгораниях. В работе отмечается, что важными для выявления опасных состояний ЗА являются показатели их структурных взаимодействий. Предлагаемые в [25] методы базируются на стационарном подходе, позволяющем выявлять лишь усредненное распределение энергии для опасных состояний. При этом не учитывается частотно-временная структура опасных состояний. Обзору методов временного и частотного разрешения посвящена работа [26]. При этом проблема частотной и временной локализации опасных состояний остается до конца не решенной. Известные методы оказываются сложными в реализации и малоприспособными для выявления опасных состояний.

В [27] рассматривается метод быстрого обнаружения опасных ЗА городов на основе вычисления предлагаемых мер рекуррентности состояний. Отмечается, что

в условиях априорной неопределенности необходимо использовать адаптивный подход. Применению такого подхода при вычислении РР ЗА посвящена работа [28]. При этом возможности использования ФН для выявления опасных состояний ЗА не рассматриваются. В [29] рассматривается временной анализ нестационарных состояний на основе преобразования Фурье для стационарных фрагментов траектории состояний. Однако ранее выявление опасных состояний обычно сопровождается нестационарными отрезками наблюдаемых данных. Исследованию применения приращений состояний в качестве признаков раннего выявления опасных состояний в локальных экосистемах посвящена работа [30]. Однако приведенные в данной работе результаты ограничиваются анализом статистики приращений основных состояний газовой среды. Особенности структурной динамики приращений состояния на основе ФН для фрагмента траектории в многомерном пространстве не рассматриваются. Общие методы частотно-временного представления и идентификации нелинейных систем на основе кратковременного преобразования Фурье рассматриваются в [31, 32]. Применение кратковременного преобразования Фурье к анализу реальных наблюдений рассматривается в [33]. При этом отмечается, что методы [31–33] оказываются достаточно сложными в реализации и не могут рассматриваться в качестве конструктивных для выявления опасных состояний в сложных динамических системах. Другие методы, базирующиеся на ФН и подходах, отличных от Фурье, не рассматриваются. При этом для выявления опасных состояний ЗА на основе ФН требуются дополнительные исследования. В работе [34] рассматривается применение известного частотно-временного подхода и его модификации к исследованию динамики опасных состояний газовой среды. Отмечается общая сложность указанных подходов.

Таким образом, следует, что в настоящее время одним из конструктивных и развиваемых методов выявления опасных состояний ЗА являются методы РР мер рекуррентности состояний. В общем случае указанные методы позволяют выявлять различные структурные особенности динамики состояний сложных систем любой природы, которые не могут быть выявлены на основе известных классических методов. Однако методы РР и мер рекуррентности остаются достаточно сложными и не в полной мере позволяют адекватно выявлять опасные состояния ЗА. Известно, что ФН широко используется в различных радиотехнических приложениях радиолокации и оптимального приема и позволяет одновременно осуществлять локализацию принимаемого сигнала по времени и радиальной скорости. Однако применение ФН для выявления опасных состояний ЗА по данным регистрации концентрации загрязнителей имеет особенности и свою специфику. Поэтому важной и нерешенной частью рассматриваемой проблемы выявления опасных ЗА городов является исследование возможности и особенностей применения для этой цели ФН для текущих концентраций загрязнений и превышений ими ПДК.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование возможностей применения функции неопределенности для выявления опасных состояний загрязненной атмосферы

на основе регистрации текущих их концентраций и превышений предельных допустимых концентраций.

Для достижения цели работы были поставлены задачи:

- рассмотреть теоретические особенности определения функции неопределенности для текущих концентраций атмосферных загрязнений;
- верифицировать возможности применения функции неопределенности для выявления опасных состояний атмосферных загрязнений на примере экспериментальных текущих превышений предельных допустимых концентраций атмосферных загрязнений для типовой городской инфраструктуры.

4. Теоретические особенности определения функции неопределенности для текущих концентраций атмосферных загрязнений

Современная теория турбулентной диффузии показывает, что распространение ЗА в виде концентраций тех или иных веществ осуществляется за счет переноса их сносящим потоком и диффузии, обусловленной турбулентными флуктуациями скорости сносящего потока. При этом молекулярным потоком, обусловленным тепловым движением молекул, можно пренебречь. В процессе переноса загрязняющее вещество может претерпевать изменения, вступая в физическое и химическое взаимодействие с частицами окружающей среды и другими примесями, которые изменяют механические, физические и химические свойства загрязняющих веществ.

Проблема турбулентного переноса и рассеивания ЗА относится к числу наиболее сложных проблем современной науки, завершеного решения которой пока нет. Объясняется это сложностью и многообразием процессов, которые происходят в реальной атмосфере при ЗА выбросами. Известно, что опасные состояния ЗА в общем случае зависят как от мощности загрязняющего выброса, так и от характеристик атмосферного переноса, и прежде всего от скорости ветра и от текущей устойчивости (стабильности) атмосферы. При этом в настоящее время отсутствует общепринятый критерий определения категорий стабильности атмосферы, и поэтому чаще используют классификацию (Паскуилла) по вертикальному градиенту температур. Такая классификация для выявления опасных состояний ЗА оказывается достаточно грубой и не учитывает конкретных текущих условий.

В общем случае выбросы ЗА производятся в случайные моменты времени без учета состояния метеорологических параметров атмосферы. При этом регистрируемые городскими постами контроля концентрации ЗА, учитывают все факторы текущего турбулентного переноса и рассеивания загрязнений. В [35] отмечается, что при изучении динамики концентраций ЗА городов в качестве санитарно-гигиенического норматива целесообразно использовать среднесуточные ПДК, которые разработаны специально для населенных мест и не вызывают в организме человека негативных последствий при неограниченно долгом воздействии. Поэтому будем полагать, что совокупность регистрируемых концентраций ЗА определяется вектором \mathbf{X} , который из-за случайного характера турбулентного переноса и рассеивания в атмосфере имеет одновременно временной и частотный сдвиг. При этом частотный сдвиг обусловлен радиальной скоростью движения ЗА в направлении поста контроля. Пусть оператор Φ_t

определяет временной сдвиг вектора \mathbf{X} концентраций исходных ЗА на величину τ , а оператор Φ_ϕ – его частотный сдвиг на величину ϕ , обусловленную радиальной скоростью V движения концентраций \mathbf{X} . Тогда для текущего вектора \mathbf{X} регистрируемых концентрации ЗА будет справедливо следующее операторное представление $\Phi_\phi(\Phi_\tau(\mathbf{X}))$. При этом энергия среднеквадратичного отклонения между вектором \mathbf{X} и вектором $\Phi_\phi(\Phi_\tau(\mathbf{X}))$ в пространстве со скалярным произведением будет определяться величиной

$$\varepsilon^2 = \|\mathbf{X} - \Phi_\phi(\Phi_\tau(\mathbf{X}))\|^2 = \|\mathbf{X}\|^2 + \|\Phi_\phi(\Phi_\tau(\mathbf{X}))\|^2 - 2\langle \mathbf{X}, \Phi_\phi(\Phi_\tau(\mathbf{X})) \rangle,$$

где $\|\mathbf{X}\|^2$ представляет собой энергию E_x регистрируемого вектора \mathbf{X} . Если временной τ и ϕ частотный сдвиги малы, то $\|\mathbf{X}\|^2 = \|\Phi_\phi(\Phi_\tau(\mathbf{X}))\|^2 = E_x$. Отсюда следует, что в этом случае $\varepsilon^2 = 2E_x - 2\langle \mathbf{X}, \Phi_\phi(\Phi_\tau(\mathbf{X})) \rangle$. При этом скалярное произведение $\langle \mathbf{X}, \Phi_\phi(\Phi_\tau(\mathbf{X})) \rangle$ в этом выражении будет определять известную ФН $\Psi(\tau, \phi) = \langle \mathbf{X}, \Phi_\phi(\Phi_\tau(\mathbf{X})) \rangle$ для вектора \mathbf{X} концентраций ЗА.

Следует заметить, что ФН $\Psi(\tau, \phi) = \langle \mathbf{X}, \Phi_\phi(\Phi_\tau(\mathbf{X})) \rangle$ обобщает понятие корреляционной функции для вектора \mathbf{X} концентраций ЗА в случае сдвига по времени и частоте из-за турбулентности и рассеивания в атмосфере. ФН $\Psi(\tau, \phi)$ обладает рядом полезных свойств. Например, значение ФН в начале координат $\Psi(0, 0) = E_x$ максимально и равно энергии вектора регистрируемых концентраций ЗА. Известно также, что двумерное преобразование Фурье ФН определяет мгновенный спектр или частотно-временную энергетическую плотность вектора ЗА для текущих значений времени и частоты. Можно показать, что квадрат модуля ФН является инвариантом по отношению к двойному преобразованию Фурье. Это свойство позволяет по ФН определять квадрат модуля мгновенного спектра или квадрата модуля частотно-временной текущей энергетической плотности для произвольных векторов концентраций ЗА.

Рассмотрим более подробно оператор Φ_ϕ частотного сдвига, определяемого радиальной скоростью V движения вектора \mathbf{X} концентраций ЗА. Указанный частотный сдвиг в общем случае обусловлен эффектом Доплера-Физо. По отношению к ЗА, этот эффект проявляется в изменении временного масштаба во временном представлении для каждого из ЗА. Если регистрируется совокупность ЗА в виде вектора $\mathbf{X}(t)$ в непрерывном времени t , то изменение временного масштаба для ЗА будет определяться вектором $\mathbf{X}(tk)$, где k – масштаб времени, определяемый величиной $k = 1 - \frac{2V}{V_0}$, V – радиальная скорость движения

вектора $\mathbf{X}(t)$, а V_0 – скорость распространения вектора $\mathbf{X}(t)$ в атмосфере. При этом указанная величина масштаба времени справедлива в случае $\frac{V}{V_0} \ll 1$. С

учетом этого ФН для вектора концентраций ЗА, регистрируемых в непрерывном времени, будет определяться соотношением

$$\Psi(\tau, k) = \langle \mathbf{X}(t), \mathbf{X}(tk - \tau) \rangle. \quad (1)$$

В случае регистрации вектора $\mathbf{X}(t)$ в дискретные моменты времени t_i , где $i=0,1,2,\dots$. При этом вектор $\mathbf{X}(t_i)=\mathbf{X}_i$. Тогда ФН, следуя (1), будет определяться

$$\Psi(\tau, k) = \langle \mathbf{X}_i, \mathbf{X}_{ik-\tau} \rangle. \quad (2)$$

В соотношении (2) величина $i=0,1,2,\dots$ определяет дискретные моменты регистрации для вектора концентраций ЗА. Это означает, что масштаб времени k и задержка τ в (2) могут принимать только соответствующие дискретные значения. Учитывая, что на практике операция (2) обычно выполняется для конечной ширины окна усреднения и, переходя от энергии к средней мощности, можем представить дискретную ФН для вектора регистрируемых концентраций ЗА

$$\Psi'(\tau, k) = \frac{1}{M} \sum_{v=0}^{M-1} \mathbf{X}_{N-v}, \mathbf{X}_{N-vk-\tau}. \quad (3)$$

В соотношении (3) величина M определяет число отсчетов окна усреднения, а N – номер дискретного момента регистрации, соответствующего конечному текущему дискретному моменту времени окна усреднения. Это позволяет использовать для вычисления ФН (3) только доступные к дискретному моменту N времени данные регистрации вектора концентрации ЗА. При реализации (3) необходимо соблюдать условие, при котором $N \geq M + Mk + \tau$. Учитывая данное условие, можно представить модифицированную процедуру для вычисления дискретной ФН для произвольных значений N, M, k и τ в следующем виде:

$$\Psi^{\mu}(N, \tau, k, M) = if \left\{ N < M + (M - 1)k + \tau, 0, \frac{1}{M} \sum_{v=0}^{M-1} \mathbf{X}_{N-v}, \mathbf{X}_{N-vk-\tau} \right\}. \quad (4)$$

Изложены теоретические основы и особенности определения ФН для текущих концентраций ЗА, регистрируемых в непрерывном и дискретном времени (3) и (4). Данные соотношения справедливы для произвольного числа и вида составляющих вектора концентраций ЗА. Кроме того, они остаются справедливыми и в случае, когда составляющие вектора представляют собой превышения ЗА ПДК. При этом ФН (3) и (4) позволяют выявлять во времени и радиальной скорости загрязнений опасные состояния в загрязненной атмосфере без учета метеорологических параметров и ее устойчивости.

5. Верификация использования функции неопределенности для выявления опасных состояний атмосферных загрязнений

Для верификации использовались реальные результаты регистрации превышения ПДК типовыми ЗА городов. В качестве ЗА рассматривались формальдегид, аммиак и оксид углерода. Возможности использования ФН для выявле-

ния опасных состояний ЗА оценивались по данным регистрации концентраций указанных ЗА для типовой городской инфраструктуры. Методика экспериментальных измерений и характеристики используемой при этом аппаратуры приведены в [27]. С целью верификации данные о концентрации ЗА нормировались относительно соответствующих среднесуточных ПДК. Поэтому в качестве составляющих исходного вектора ЗА использовались данные о превышении ЗА соответствующих среднесуточных ПДК. Для верификации выбирались данные регистрации концентрации ЗА, принадлежащие ограниченному интервалу от 490 отсчета до 520 отсчета. Выбор данного интервала для верификации связан с достоверным наличием на нем опасного состояния ЗА (район 506 отсчета). На рис. 1, *а*, *б* приведены результаты вычисления ФН (3) в плоскости время-задержка для различного числа отсчетов в окне усреднения, определяемого 8 отсчетами (двое суток) и 4 отсчетами (одни сутки) соответственно.

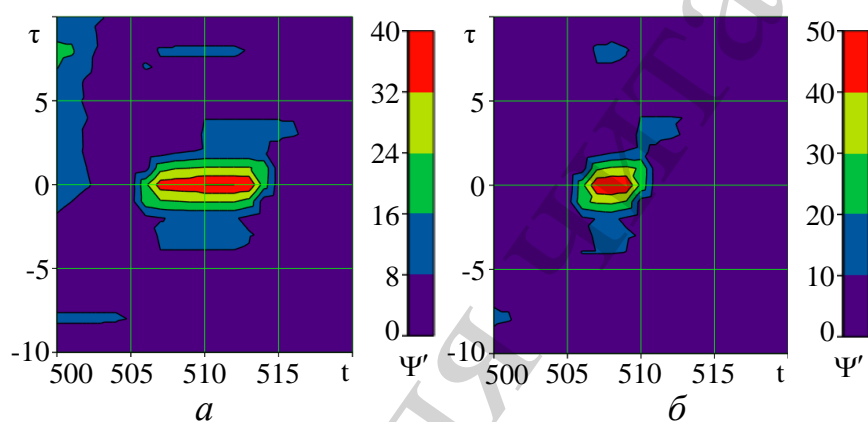


Рис. 1. Влияние величины окна усреднения при вычислении ФН (3) в плоскости время-задержка: *а* – 8 отсчетов; *б* – 4 отсчета

Аналогичные результаты в плоскости время–масштаб времени приведены на рис. 2. На рис. 3, *а*, *б* приведены результаты вычисления ФН (3) в плоскости задержка–масштаб времени при различном числе отсчетов в окне усреднения для фиксированного дискретного момента времени $i=506$.

Иллюстрация динамики ФН, определяемой (4), в координатах текущее время-задержка и текущее время-масштаб времени при фиксированном окне усреднения в одни сутки (4 отсчета) для различных параметров, характеризующих нулевой радиальной скоростью V ЗА ($k=1$) и нулевой задержкой, приведена на рис. 4, *а*, *б* соответственно.

На рис. 5 приведен вид текущей ФН (4) в традиционных координатах задержка–масштаб времени для фиксированного дискретного момента времени $i=506$ при различных значениях величины окна усреднения, определяемого двумя сутками (8 отсчетами) и одними сутками (4 отсчетами) соответственно.

Из рис. 5 следует, что при определении ФН ЗА в координатах задержка–масштаб времени для фиксированного дискретного момента времени присущи некоторые преимущества выбора широких окон усреднения.

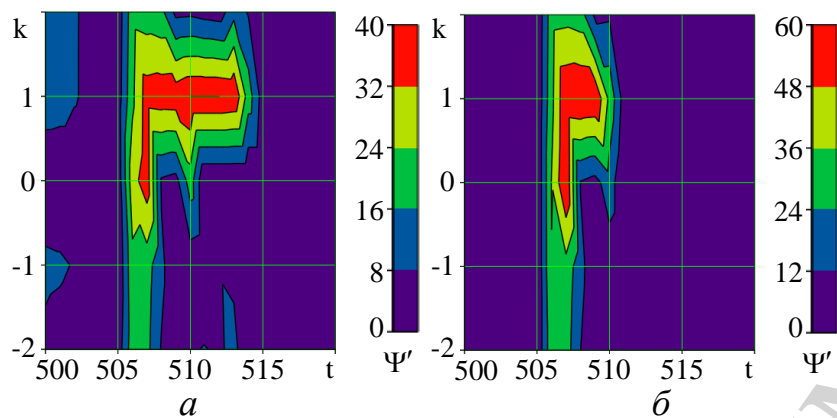


Рис. 2. Влияние величины окна усреднения при вычислении ФН (3) в плоскости время-масштаб времени: a – 8 отсчетов; b – 4 отсчета

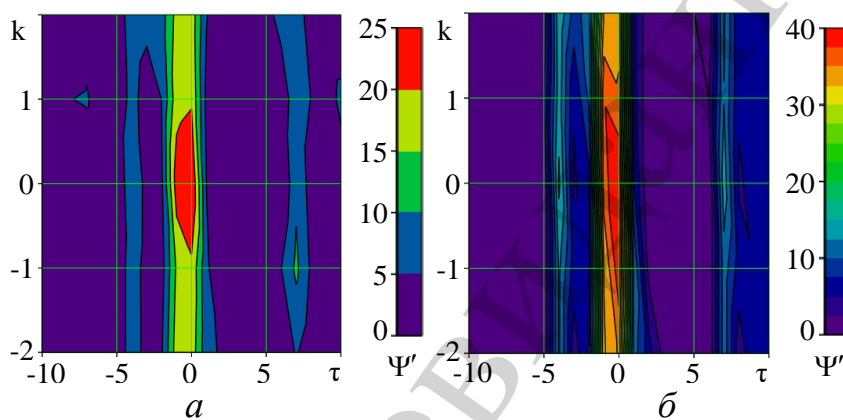


Рис. 3. Влияние величины окна усреднения при вычислении ФН (3) в плоскости задержка-масштаб времени: a – 8 отсчетов; b – 4 отсчета

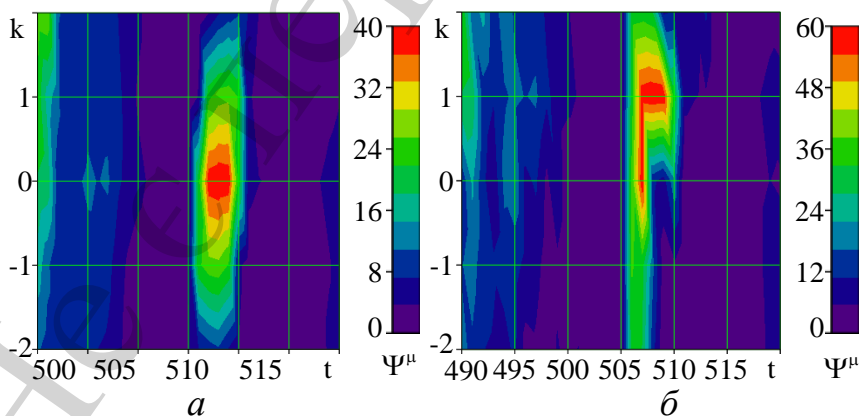


Рис. 4. Динамика ФН (4) состояний атмосферных загрязнений при окне усреднения в 4 отсчета для различных параметров: a – нулевая радиальная скорость V загрязнений ($k=1$); b – нулевая задержка

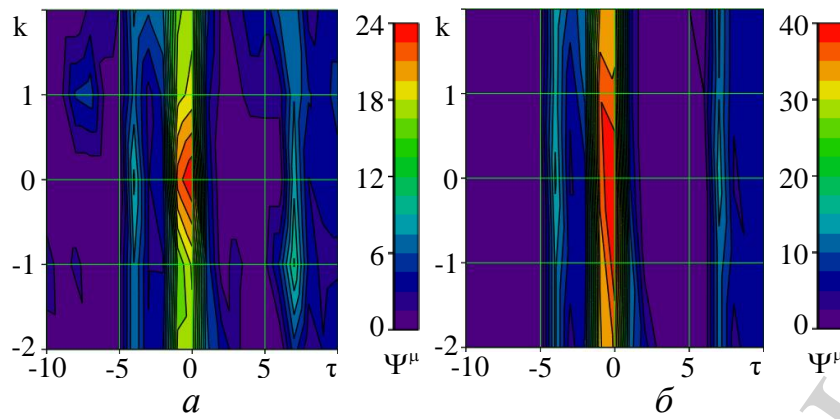


Рис. 5. Вид ФН (4) атмосферных загрязнений в координатах задержка-масштаб времени для фиксированного дискретного момента времени $i=506$ при значениях величины окна усреднения: а – 8 отсчетов; б – 4 отсчета

6. Обсуждение результатов верификации использования функции неопределенности для выявления атмосферных загрязнений

Результаты, приведенные на рис. 1, свидетельствуют в целом о наличии влияния ширины используемого окна усреднения при вычислении ФН вида (3) на выявление и локализацию опасных ЗА. Для наилучшей временной локализации опасных состояний ЗА на основе ФН необходимо использовать узкие окна, длительность которых не превышает одни сутки. Если длительность окна усреднения составляет двое суток, то сечение ФН расширяется и смещается в сторону предшествующих моментов времени. При этом оптимальные значения временной локализации достигаются для нулевой задержки в ФН. Аналогичные требования к ширине окна остаются справедливыми для вычисления (3) и в случае использования для выявления опасных состояний ЗА масштаба времени (рис. 2). Величина масштаба времени при этом не только обеспечивает временную локализацию опасных ЗА, но и позволяет выявлять причины их возникновения, обуславливаемые радиальными скоростями перемещения загрязнений неоднородной атмосферой. Из анализа данных, приведенных на рис. 3, следует, что ФН (3) для дискретного момента времени $i=506$ в плоскости задержка-масштаб времени слабо зависит от задержки при различном числе отсчетов в окне усреднения. Однако ее значение по оси масштаб времени существенно зависит от ширины окна усреднения. При этом для ширины окна 8 отсчетов локализация опасных ЗА по оси масштаб времени оказывается вдвое лучше по сравнению с шириной окна 4 отсчета. Иллюстрация динамики ФН, определяемой (4), в координатах текущее время-задержка и текущее время-масштаб времени при фиксированном окне усреднения в 4 отсчета при различных параметрах, характеризующих нулевой радиальной скоростью V ЗА и нулевой задержкой (рис. 4) свидетельствуют о преимуществах использования ФН при выявлении опасных ЗА. Указанные преимущества состоят в возможности использования для выявления опасных ЗА их энергетических и скоростных параметров. При этом метеорологическая информация о текущем состоянии атмосферы не используется. Вид ФН (4) ЗА, приведенных на рис. 5, в координатах задержка-

масштаб времени для фиксированного дискретного момента времени $i=506$ показывают некоторые преимущества выбора широких окон усреднения. Эти выводы не противоречат возможностям, представленным на рис. 3.

Результаты исследования могут быть рекомендованы к использованию для оперативного и надежного выявления опасных состояний ЗА. При этом не требуется текущая метеорологическая информация в районе стационарного поста контроля. На практике данные результаты позволяют существенно повысить эффективность выявления опасных состояний при загрязнении атмосферного воздуха вне зависимости от конкретной городской конфигурации и метеоусловий. Полученные результаты могут быть положены в основу модернизации существующих методик оценивания загрязнений, которые основаны на вычислении только средних годовых ПДК. Известно, что средние значения ПДК являются довольно грубой оценкой ЗА. Часто на практике использование среднего ПДК не позволяет выявлять опасное ЗА, которое вызывает негативное воздействие на человека и окружающую среду. В повседневной жизни эколога-практика применение функции неопределенности позволяют для текущих ПДК стационарных постов контроля выявлять опасные ЗА для любого набора загрязнителей. Вычисление функции неопределенности для ПДК не представляет особых трудностей. Расчеты с использованием приведенных рабочих алгоритмов можно осуществлять на любом ПК. Возможность одновременного выявления ламинарных состояний в атмосфере позволяет прогнозировать возрастание ПДК. При этом целесообразно ограничивать уровень выбросов источниками загрязнений в атмосферу с целью недопущения накопления загрязнений и предупреждения опасных ЗА.

К ограничениям рассмотренных результатов можно отнести достаточно большой интервал дискретной регистрации данных о концентрации загрязнений, определяемый 6 часами. Это несколько сужает возможности выявления опасных состояний по радиальной скорости загрязнений.

9. Выводы

1. Рассмотрены теоретические особенности определения функции неопределенности для текущих концентраций атмосферных загрязнений, регистрируемых в непрерывном и дискретном времени. Отмечается, что данные соотношения справедливы для произвольного числа и вида составляющих регистрируемого вектора концентраций загрязнителей атмосферы. Показано, что соотношения остаются справедливыми и в случае, когда составляющие вектора представляют собой превышения загрязнителями ПДК. При этом функции неопределенности (3) и (4) позволяют выявлять опасные состояния в загрязненной атмосфере по времени и радиальной скорости движения загрязнений без учета текущих метеорологических параметров атмосферы и ее устойчивости.

2. Произведена верификация возможности применения функции неопределенности для выявления опасных состояний атмосферных загрязнений на примере экспериментальных текущих превышений предельных допустимых концентраций рассматриваемых атмосферных загрязнений для типовой городской инфраструктуры. Приведенные результаты верификации свидетельствуют о достаточных преимуществах использования функции неопределенности для

регистрируемых концентраций атмосферных загрязнений с целью выявления опасных состояний загрязнений по их энергетическим и скоростным характеристикам совместно. Установлено, что ширина окна усреднения для регистрируемых концентраций загрязнителей должна составлять от 4 до 8 отсчетов, что соответствует от суток до двух суток.

Литература

1. Kondratenko, O. M., Vambol, S. O., Stokov, O. P., Avramenko, A. M. (2015). Mathematical model of the efficiency of diesel particulate matter filter. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 55–61.
2. Vasiliev, M. I., Movchan, I. O., Koval, O. M. (2014). Diminishing of ecological risk via optimization of fire-extinguishing system projects in timber-yards. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 106–113.
3. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2017). Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (90)), 11–16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.114504>
4. Semko, A., Rusanova, O., Kazak, O., Beskrovnaya, M., Vinogradov, S., Gricina, I. (2015). The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out. *The International Journal of Multiphysics*, 9 (1), 9–20. doi: <https://doi.org/10.1260/1750-9548.9.1.9>
5. Kustov, M. V., Kalugin, V. D., Tutunik, V. V., Tarakhno, E. V. (2019). Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 1, 92–99. doi: <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99>
6. Vasyukov, A., Loboichenko, V., Bushtec, S. (2016). Identification of bottled natural waters by using direct conductometry. *Ecology Environment and Conservation*, 22 (3), 1171–1176.
7. Pascual, M., Ellner, S. P. (2000). Linking ecological patterns to environmental forcing via nonlinear time series models. *Ecology*, 81 (10), 2767–2780. doi: [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2000\)081\[2767:leptef\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2000)081[2767:leptef]2.0.co;2)
8. Parrott, L. (2004). Analysis of simulated long-term ecosystem dynamics using visual recurrence analysis. *Ecological Complexity*, 1 (2), 111–125. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2004.01.002>
9. Proulx, R. (2007). Ecological complexity for unifying ecological theory across scales: A field ecologist's perspective. *Ecological Complexity*, 4 (3), 85–92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2007.03.003>
10. Marwan, N., Kurths, J. (2002). Nonlinear analysis of bivariate data with cross recurrence plots. *Physics Letters A*, 302 (5-6), 299–307. doi: [https://doi.org/10.1016/s0375-9601\(02\)01170-2](https://doi.org/10.1016/s0375-9601(02)01170-2)
11. Kantz, H., Schreiber, T. (2003). *Nonlinear Time Series Analysis*. Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511755798>
12. Eckmann, J.-P., Kamphorst, S. O., Ruelle, D. (1987). Recurrence Plots of Dynamical Systems. *Europhysics Letters (EPL)*, 4 (9), 973–977. doi: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/4/9/004>

13. Webber, C. L., Zbilut, J. P.; Riley, M. A., Van Orden, G. (Eds.) (2004). Chapter 2. Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. *Tutorials in Contemporary Nonlinear Methods for the Behavioral Sciences*. URL: <https://www.nsf.gov/pubs/2005/nsf05057/nmbs/nmbs.pdf>
14. Webber, C. L., Zbilut, J. P. (1994). Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies. *Journal of Applied Physiology*, 76 (2), 965–973. doi: <https://doi.org/10.1152/jappl.1994.76.2.965>
15. Marwan, N., Trauth, M. H., Vuille, M., Kurths, J. (2003). Comparing modern and Pleistocene ENSO-like influences in NW Argentina using nonlinear time series analysis methods. *Climate Dynamics*, 21 (3-4), 317–326. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-003-0335-3>
16. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych, P. (2018). Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (9 (93)), 34–40. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133127>
17. Turcotte, D. L. (1997). *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174695>
18. Poulsen, A., Jomaas, G. (2011). Experimental Study on the Burning Behavior of Pool Fires in Rooms with Different Wall Linings. *Fire Technology*, 48 (2), 419–439. doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-011-0230-0>
19. Zhang, D., Xue, W. (2010). Effect of heat radiation on combustion heat release rate of larch. *Journal of West China Forestry Science*, 39, 148.
20. Andronov, V., Pospelov, B., Rybka, E. (2017). Development of a method to improve the performance speed of maximal fire detectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (86)), 32–37. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96694>
21. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (9 (88)), 53–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108448>
22. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Research into dynamics of setting the threshold and a probability of ignition detection by self-adjusting fire detectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (9 (89)), 43–48. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110092>
23. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Gornostal, S. (2018). Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (95)), 25–30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142995>
24. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Gornostal, S., Shcherbak, S. (2017). Results of experimental research into correlations between hazardous factors of ignition of materials in premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (90)), 50–56. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117789>
25. Bendat, J. S., Piersol, A. G. (2010). *Random data: analysis and measurement procedures*. John Wiley & Sons, 640.

26. Shafi, I., Ahmad, J., Shah, S. I., Kashif, F. M. (2009). Techniques to Obtain Good Resolution and Concentrated Time-Frequency Distributions: A Review. *EUR-ASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2009 (1). doi: <https://doi.org/10.1155/2009/673539>
27. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych, P., Gornostal, S. (2019). Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10 (97)), 29–35. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155027>
28. Pospelov, B., Rybka, E., Togobytska, V., Meleshchenko, R., Danchenko, Y., Butenko, T. et. al. (2019). Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (100)), 22–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176579>
29. Singh, P. (2016). Time-frequency analysis via the fourier representation. HAL. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01303330/document>
30. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Popov, V., Romin, A. (2018). Experimental study of the fluctuations of gas medium parameters as early signs of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10 (91)), 50–55. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122419>
31. Stankovic, L., Dakovic, M., Thayaparan, T. (2014). Time-frequency signal analysis. Kindle edition, Amazon, 655.
32. Avargel, Y., Cohen, I. (2010). Modeling and Identification of Nonlinear Systems in the Short-Time Fourier Transform Domain. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58 (1), 291–304. doi: <https://doi.org/10.1109/tsp.2009.2028978>
33. Giv, H. H. (2013). Directional short-time Fourier transform. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 399 (1), 100–107. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2012.09.053>
34. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Popov, V., Semkiv, O. (2018). Development of the method of frequency-temporal representation of fluctuations of gaseous medium parameters at fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (92)), 44–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125926>
35. Ахтиманкина, А. В. (2015). Исследование динамики концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе г. Шелехова. *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле»*, 13, 42–57.