

## Разработка метода полуадаптивной масштабной трансформации порога при вычислении рекуррентных диаграмм

Б. Б. Поспелов, Е. А. Рыбка, В. Д. Тогобицкая, Р. Г. Мелещенко, Ю. М. Данченко, Т. Ю. Бутенко, И. Н. Волков, О. В. Гафуров, В. А. Евсеев

*Розроблено метод напіваадаптивної масштабної трансформації порогу, що забезпечує обчислення рекуррентних діаграм, які адекватно відображають особливості динаміки реальних складних динамічних систем природної і технічної сфери. Новий науковий результат полягає в розвитку теоретичної основи методу напіваадаптивної масштабної трансформації порогу при обчисленні рекуррентних діаграм шляхом удосконалення лінійних нормованих просторів за рахунок введення скалярного добутку векторів. Пропонований метод трансформації порога забезпечує обчислення рекуррентних діаграм, які мають підвищену інформативність, інваріантність щодо параметрів вимірюваних векторів станів, а також нерегулярності вимірювань. Перевірка працездатності запропонованого методу напіваадаптивної масштабної трансформації порогу проведена на основі експериментальних вимірювань концентрацій формальдегіду, аміаку та оксиду вуглецю в атмосферному повітрі типового промислового міста при традиційних стаціонарних та рухомих джерелах забруднень. Отримані результати обчислення рекуррентних діаграм з урахуванням запропонованого методу напіваадаптивної масштабної трансформації порогу в цілому підтверджують його працездатність. Встановлено, що обчислення RP при напіваадаптивній трансформації порогу для різних кутових розмірів  $\alpha$  конуса рекуррентності, рівних  $1^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  і  $20^\circ$  свідчить про те, що зі зменшенням кутових розмірів конуса точність рекуррентних діаграм виявляти небезпечні стани в динамічних системах зростає. Експериментально встановлено, що для адекватного відображення рекуррентних станів реальних динамічних систем, за допомогою обчислюваних рекуррентних діаграм, значення величини кутових розмірів конуса рекуррентності повинні складати  $1-5^\circ$*

*Ключові слова: рекуррентная діаграма, складні динамічні системи, напіваадаптивна трансформація порога, забруднення атмосфери*

### 1. Введение

Большинство реальных природных, технических и социальных систем обладают рекуррентным поведением, которое означает, что определенные состояния систем часто повторяются во времени [1]. Для визуализации рекуррентного поведения систем предложены методы рекуррентных диаграмм (RP) [2], являющиеся базовой основой методов количественного анализа рекуррентности (RQA). В последнее время методы RP и RQA широко используются в различных науках [1, 3–6]. Современное состояние методов RP и RQA представлено в [7]. При этом возможности методов RQA существенно зависят от адекватности отображения RP

рекуррентного поведения реальных систем. Поэтому обеспечению точности отображения рекуррентных состояний систем в RP для реальных систем уделяется особое внимание. Известно, что точность отображения рекуррентных состояний систем при вычислении RP зависит от конкретных условий измерений и реализуемых при этом методов обработки измерительной информации. Одним из ограничений известных методов вычисления RP при заданном функционале нормы [7] является зависимость точности отображения рекуррентных состояний от используемого порога – пороговая неопределенность методов вычисления RP. При различных и изменяющихся условиях, характерных для большинства приложений, пороговая неопределенность методов снижает точность отображения рекуррентных состояний реальных систем. Существующее многообразие типов реальных систем, условий измерения их состояний и наличие пороговой неопределенности известных методов вычисления RP, снижающих точность отображения рекуррентных состояний. В этой связи необходимость повышения точности отображения RP в реальных условиях порождают проблему совершенствования известных методов вычисления RP.

## **2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

Известно, что методы RP и RQA применимы к результатам реальных измерений состояния динамических систем. Поэтому являются привлекательным инструментарием при исследовании поведения сложных динамических систем различной сферы [2]. Вектор состояния динамических систем обычно имеет конечный размер и изменяется во времени. При дискретных во времени измерениях вектор состояния в фиксированный момент времени определяет в соответствующем фазовом пространстве координаты некоторой точки, движущейся вдоль некоторой траектории состояний системы. В этом случае рекуррентность состояний системы в различные моменты времени означает, что произвольные точки указанной траектории оказываются в некотором смысле близкими [4]. Методы RP, в отличие от методов корреляционной размерности [8–9], позволяют отображать многомерные траектории состояний сложных динамических систем в 2-мерное фазовое пространство. При этом в структуре динамики состояний систем учитываются возмущающие воздействия и искажения в каналах измерения. Следуя [10], судить о структуре динамики состояний всей системы возможно и по измерениям только одной измеряемой координаты вектора состояний. Однако при этом возникает дополнительная неопределенность при вычислении RP, в виде параметра размерности вложения. Метод прогнозирования опасных состояний атмосферных загрязнений в промышленных городах на основе меры рекуррентности состояний только для одной координаты рассматривается в [11]. Вычисление RP и предлагаемых мер рекуррентности производится для обычной метрики (расстояние) в пространстве всех действительных чисел. Другие виды метрик и соответствующие им метрические пространства не рассматриваются. Метод вычисления RP для вектора состояний скоростей ветра в пяти районах Нигерии рассматривается в [12]. Исследование ограничивается только рассмотрением линейного пространства с евклидовой метрикой. Иные метрики и пространства, а также масштабная трансформация порогов при вычислении RP, не рассматриваются. Параметризация вы-

числения RP в условиях артефактов в реконструированном векторе состояний [10] рассматривается в [13]. Исследование ограничивается евклидовой метрикой пространства. Другие типы метрик и масштабирование порога при этом не рассматриваются и не обсуждаются. Методы вычисления RP для реконструированного вектора состояний магнитосферы Земли рассматриваются в [14] и ограничиваются нормированными линейными пространствами с максимальной метрикой и метрикой Чебышева. В работе [15] рассматривается решение задачи распознавания и классификации различной двигательной активности человека. Для преодоления пороговой неопределенности методов вычисления RP в этих условиях, связанного с трудностями и ошибками, предлагается исключить порог и вместо RP вычислять матрицы расстояний. Однако такой подход, по нашему мнению, является не конструктивным, поскольку приводит к дополнительной проблеме определения рекуррентных состояний по матрице расстояний. Решение этой проблемы предлагается осуществлять с помощью нейронной сети, обладающей известными недостатками и ограничениями. Использование метода вычисления RP в пространстве с евклидовой метрикой для анализа поведения различных биологических систем рассматривается в [16]. Отмечается, что на точность вычисления RP оказывают влияние измерения, временная задержка, размерность вложения, а также порог. При этом уточняется, что порог для каждого набора измерений должен быть различным, но не превышать 10 % от величины максимального диаметра, соответствующего фазового пространства.

Важный для приложений метод вычисления RP при нерегулярных измерениях основывается на метрическом пространстве с метрикой в виде расстояния между соответствующими измерениями [17]. В работе [7] даются общие рекомендации по преодолению пороговой неопределенности. Отмечается, что пороговая неопределенность может преодолеваться путем фиксации величины порога, исходя из требований конкретной задачи исследования. При этом в работе [18] утверждается, что для выявления особенностей динамики состояний реальной системы при вычислении RP порог должен являться функцией стандартного отклонения в измерениях. Однако вид самой функции не указывается, а отмечается только, что такой способ определения порога может быть полезным при использовании любого метода вычисления RP. Комбинация многоуровневого сетевого подхода и рекуррентных сетей для анализа поведения многомерных состояний рассматривается в работе [19]. Однако исследования ограничиваются рассмотрением вектора состояний только в нормированном пространстве с евклидовой метрикой. Другие типы метрик и пространства не рассматриваются. В работе [20] описываются новые методы вычисления RP для данных бурения с целью изучения динамики системы формирования рудного тела. При этом исследование ограничивается нормированным пространством общего вида с произвольной метрикой без ее конкретизации. В работе [1] рассматривается метод вычисления RP для вектора состояний динамических систем в абстрактном фазовом пространстве с тривиальной метрикой. Особенности вычисления RP для локализации переходных процессов в системах рассматриваются в [21]. Следует заметить, что в методах вычисления RP могут использоваться пространства состояний с различными метриками. При этом вопросы влияния метрик и масштабирования порога на результат вычисления RP

не рассматриваются. Применение метода RP концентрации угарного газа для раннего выявления возгораний в помещениях рассматривается в [22]. Однако исследования ограничиваются рассмотрением измерений в одномерном пространстве с обычной и степенной метриками расстояний. При этом многомерные пространства и масштабирование порога не рассматриваются. Методы и устройства самонастраивающегося выявления опасных факторов ранних возгораний в одномерном случае рассматриваются в [23]. Отмечается, что выбор порога при этом является ключевым для надежного выявления [24].

Проведенный анализ свидетельствует, что известные методы вычисления RP основываются на линейных нормированных пространствах конечной мерности и различных типах метрик. К настоящему времени более изученными можно считать методы вычисления RP в линейных пространствах с равномерной, евклидовой и максимальной метрикой, задающих соответствующую собственную топологию пространств. Поэтому RP для одной и той же системы, вычисленные в пространствах с различными метриками, будут отличаться. В меньшей степени изучены методы вычисления RP в пространствах с другими типами метрик. Кроме метрики на точность отображения рекуррентных состояний систем в RP оказывает влияние порог рекуррентности. В силу указанного влияния, проблема выбора порога рекуррентности становится ключевой в методах вычисления RP, адекватно отображающих реальную рекуррентность состояний систем [1]. На данный момент известны несколько эвристик выбора порога [7, 25]. Однако применимы для частных условий, ограничиваются известными метриками и имеют существенные реализационные недостатки. В этой связи можно утверждать, что важной и нерешенной частью проблемы совершенствования известных методов вычисления RP является отсутствие методов трансформации порога, обеспечивающих отображение рекуррентности состояний адекватное реальным системам.

### **3. Цель и задачи исследования**

Целью исследования является разработка метода полуадаптивной масштабной трансформации порога при вычислении рекуррентных диаграмм, обеспечивающего адекватное отображение рекуррентных состояний реальных систем природной и технической сферы.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- теоретически обосновать метод полуадаптивной масштабной трансформации порога при вычислении рекуррентных диаграмм для сложных динамических систем;
- экспериментально проверить работоспособность метода полуадаптивной масштабной трансформации порога при вычислении рекуррентных диаграмм на примере реальной динамики состояний опасных загрязнителей атмосферы.

### **4. Теоретическое обоснование метода полуадаптивной масштабной трансформации порога при вычислении рекуррентных диаграмм**

Методы вычисления RP основываются на измерениях произвольного  $m$ -мерного вектора  $Z_i$  состояний исследуемой динамической системы в дискретные моменты времени  $i$  и определяются выражением

$$R_{i,j}^m = \Theta\left(\varepsilon - \|Z_i - Z_j\|\right), \quad Z_i \in \Omega^m, \quad Z_j \in \Omega^m, \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, N_S - 1, \quad (1)$$

где  $\Theta(*)$  – функция Хевисайда;  $\varepsilon$  – порог рекуррентности или предельный размер окрестности точки, характеризуемой вектором  $Z_i$  в момент времени  $i$  в рассматриваемом пространстве;  $\|*\|$  – знак нормы в этом пространстве;  $N_S$  – максимальное число измерений вектора  $Z_i$  состояний системы. Следуя выражению (1), в общем случае RP для произвольного вектора  $Z_i$  будут зависеть от выбранной нормы и порога  $\varepsilon$  рекуррентности. При фиксированном пороге  $\varepsilon$  разные нормы будут влиять на количество рекуррентных точек в (1). Если норма задана, то слишком малый порог  $\varepsilon$  может привести к тому, что точки рекуррентности в RP будут отсутствовать, хотя на самом деле они есть в реальной системе. С другой стороны, если величина порога  $\varepsilon$  слишком большая, то почти каждая точка, соответствующая вектору состояний в фазовом пространстве, окажется рекуррентной к любой другой точке. Это означает, что при заданной норме выбор порога  $\varepsilon$  рекуррентности в (1) должен быть согласованным и компромиссным. В общем случае требуется разработка методов выбора порога в (1), обеспечивающего вычисление RP, адекватных исследуемым динамическим системам. Наличие шумов измерений будет дополнительно искажать RP (1). Поэтому в [26] фиксированный порог  $\varepsilon$  в (1) предлагается выбирать равным нескольким процентам максимального диаметра рассматриваемого фазового пространства. Однако порог не должен превышать 10 % среднего или максимального диаметра фазового пространства. Другой подход базируется на заданной модели динамики состояний системы в виде композиции детерминированной составляющей и случайной с заданным стандартным отклонением  $\sigma$  [27]. Отмечается, что для адекватного отображения RP порог  $\varepsilon$  должен выбираться из условия  $\varepsilon > 5\sigma$ .

Отсутствие адаптации порога к задаваемой норме и условиям измерения состояний систем, сложность и не универсальность известных норм и метрик пространств в методах вычисления RP ограничивают возможности отображения рекуррентных состояний адекватных реальным системам. В этой связи возникает потребность в разработке метода адаптивной трансформации порога с учетом заданной нормы при вычислении RP, обеспечивающего адекватное отображение динамики рекуррентных состояний сложных систем.

Основой разработки такого метода следует считать предложенный переход к некоторому усовершенствованному пространству за счет введения дополнительной геометрической характеристики в виде скалярного произведения двух векторов [28]. Следуя [28], в усовершенствованном пространстве скалярное произведение будет порождать норму. Данная норма в свою очередь будет порождать соответствующую метрику вида

$$d(Z_i, Z_j) = \|Z_i - Z_j\| = \sqrt{(Z_i - Z_j)^T (Z_i - Z_j)}. \quad (2)$$

Учитывая (2), метод вычисления RP (1) для произвольных  $m$ -мерных векторов  $Z_i$  состояний исследуемой системы в рассматриваемом пространстве усовершенствованной структуры будет описываться выражением

$$R_{i,j}^{m,\varepsilon} = \Theta \left( \varepsilon - \sqrt{(Z_i - Z_j)^T (Z_i - Z_j)} \right). \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что норма при вычислении RP в пространстве усовершенствованной структуры эквивалентна норме метода (1), порождающей евклидову метрику. При этом важной особенностью метода (3) является то, что вычисление евклидовой метрика заменяется скалярным произведением разности соответствующих векторов состояний системы. В методе (3) порог  $\varepsilon$  является фиксированным и может выбираться на основе известных подходов и рекомендаций [26, 27]. В отличие от (1), скалярное произведение  $(Z_i - Z_j)^T (Z_i - Z_j)$  в (3) содержит информацию не только о квадрате расстояния между векторами состояний  $Z_i$  и  $Z_j$  системы при евклидовой метрике, а также информацию о квадратах длин указанных векторов и взаимном угловом положении векторов в рассматриваемом усовершенствованном пространстве. Информация, содержащаяся в скалярном произведении  $(Z_i - Z_j)^T (Z_i - Z_j)$  в (3), позволяет разработать и реализовать метод полуадаптивной масштабной трансформации порога  $\varepsilon$  при евклидовой метрике в (1). Суть метода состоит в том, что порог  $\varepsilon$  не фиксируется, а определяется путем адаптивной масштабной трансформации в соответствии с измеряемыми векторами состояний  $Z_i$  и  $Z_j$  для фиксированного значения угла  $\gamma$  между указанными векторами в рассматриваемом пространстве. Следуя теореме косинусов, можно показать, что полуадаптивный порог будет определяться выражением

$$\varepsilon(Z_i, Z_j, \gamma) = \sqrt{Z_i^T Z_i + Z_j^T Z_j - 2\sqrt{Z_i^T Z_i} \sqrt{Z_j^T Z_j} \cos \gamma}. \quad (4)$$

На основании выражения (4) порог  $\varepsilon(Z_i, Z_j, \gamma)$  является адаптивным к векторам состояний  $Z_i, Z_j$  и зависит от угла  $\gamma$  между этими векторами. При этом величина угла  $\gamma$  задает граничный уровень угловой рекуррентности состояний системы. Если в (4) положить  $\gamma = \pi\alpha/180$ , то величина  $\alpha$  будет задавать допустимый угловой сектор в градусах, в пределах которого векторы состояний  $Z_j$  считаются рекуррентными векторам состояний  $Z_i$  в момент времени  $i$  в усовершенствованном пространстве. Величина  $\alpha$  допустимого углового сектора определяет рекуррентность для ненулевых векторов состояний. Поэтому вычисление (3) при пороге (4) обеспечивает инвариантность RP к измерениям векторов состояний. При этом метод вычисления RP (3) соответствует отображению динамики в случае конических окрестностей рекуррентности вместо традиционных сферических окрестностей.

## 5. Экспериментальная проверка работоспособности метода полуадаптивной масштабной трансформации порога

Проверка работоспособности предлагаемого метода осуществлялась на основе экспериментальных данных измерений реальной динамики типовых опасных газовых загрязнителей городской атмосферы. Известно, что главными источниками загрязнений городской атмосферы являются автотранспорт [29], пожары [30, 31] и аварии на объектах критической инфраструктуры [32]. При этом существует устойчивая связь глобальных загрязнений атмосферы с парниковым эффектом, кислотными дождями [33], а также загрязнением водоносных слоев [34]. Поэтому в качестве измеряемых компонент вектора состояний загрязнений атмосферы выбирались формальдегид ( $\text{CH}_2\text{O}$ ), аммиак ( $\text{NH}_3$ ) и оксид углерода ( $\text{CO}$ ). Методика экспериментальных исследований подробно описана в [35]. Измерения концентраций газовых загрязнителей атмосферы выполнялись с помощью портативного газоанализатора DRÄGER PAC 7000 (Германия). Обеспечивает короткое время отклика (до 20 с) и высокую точность измерения ( $0,01 \text{ мг/м}^3$ ). В качестве тестового выбирался интервал измерений превышения предельных допустимых концентраций (ПДК) указанных загрязнителей в атмосфере, начиная с 13:00 3 мая 2018 года ( $i=490$ ) по 01:00 11 мая 2018 года ( $i=520$ ). На рис. 1 приведены результаты измерений динамики состояний концентраций формальдегида (красная кривая), аммиака (синяя кривая) и оксида углерода (коричневая кривая) в атмосфере относительно их ПДК в течение тестового интервала.

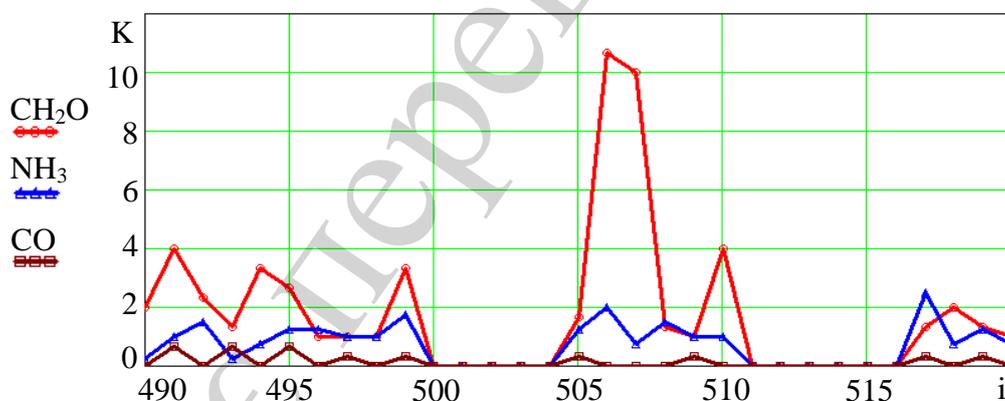


Рис. 1. Динамика концентраций загрязнителей относительно ПДК в атмосфере

На основании данных, приведенных на рис. 1, наиболее опасным состоянием загрязнений атмосферы на тестовом интервале следует считать промежуток между 504 и 511 отсчетами. Для проверки эффективности предлагаемого метода по данным на рис. 1 вначале вычислялись  $RP$  в соответствии с (1) при фиксированном пороге  $\varepsilon$ , равном 4 условным единицам, для нормированных пространств с равномерной, евклидовой и максимальной метрикой. На рис. 2 представлены соответствующие диаграммы, вычисленные для этого случая. При этом влияние величины порога на структуру  $RP$  иллюстрируется данными на рис. 3 при меньшем пороге  $\varepsilon=2$ .

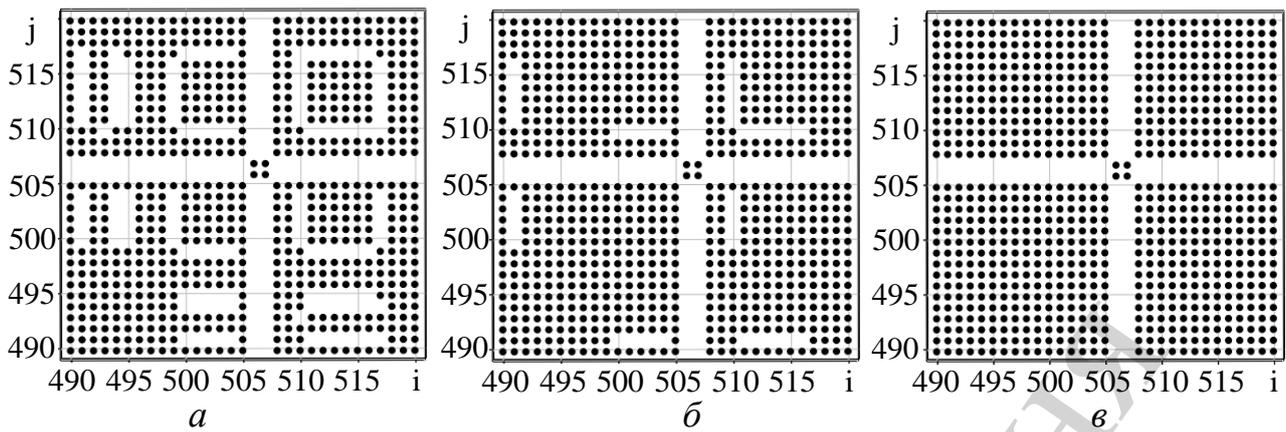


Рис. 2. RP загрязнений атмосферы на тестовом интервале для порога  $\varepsilon=4$  и различных метрик: *a* – равномерная; *б* – евклидова; *в* – максимальная

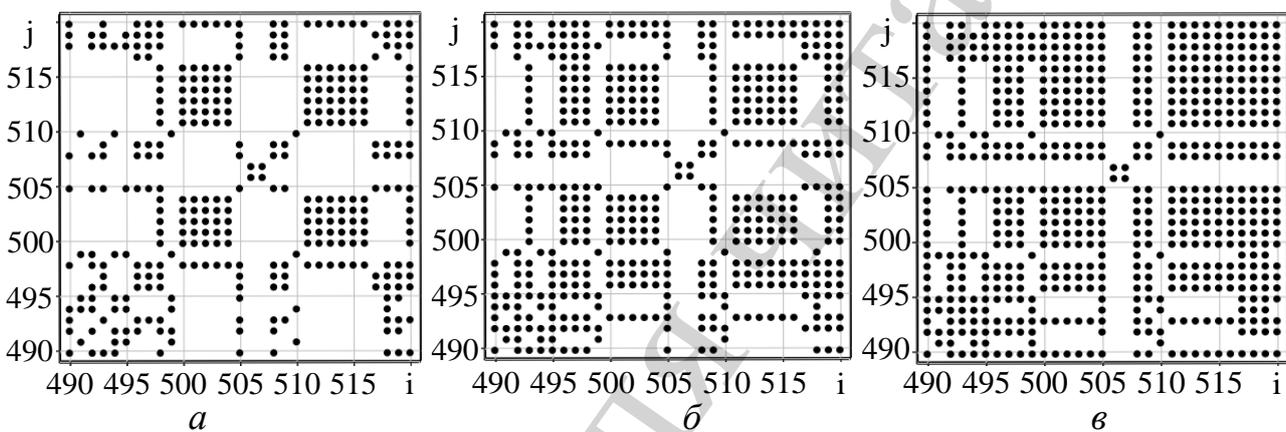


Рис. 3. RP загрязнений атмосферы на тестовом интервале для порога  $\varepsilon=2$  и различных метрик: *a* – равномерная; *б* – евклидова; *в* – максимальная

Затем в ходе проверки вычислялись RP в предлагаемом усовершенствованном пространстве, следуя выражению (4), для тех же фиксированных значений порога  $\varepsilon$ , равных 4 и 2 условным единицам. Результаты вычислений RP для этого случая приведены на рис. 4.

Далее вычислялись RP загрязнений атмосферы на тестовом интервале с учетом реализации предлагаемого метода (3), но при реализации метода полуадаптивной трансформации порога (4) для различных значений  $\alpha$  допустимого угла конуса рекуррентности. Результаты этих вычислений иллюстрируются на рис. 5 для значений  $\alpha$ , равных  $1^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  и  $20^\circ$ .

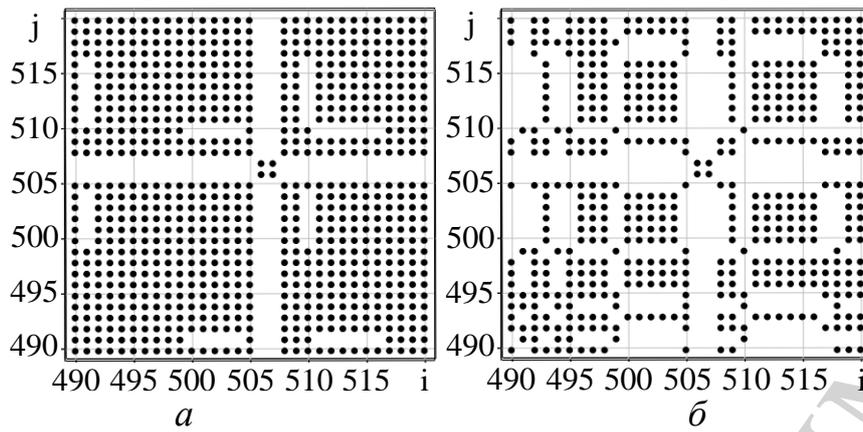


Рис. 4. RP загрязнений атмосферы на тестовом интервале в усовершенствованном пространстве для значений порога:  $a - \varepsilon=4$ ;  $b - \varepsilon=2$

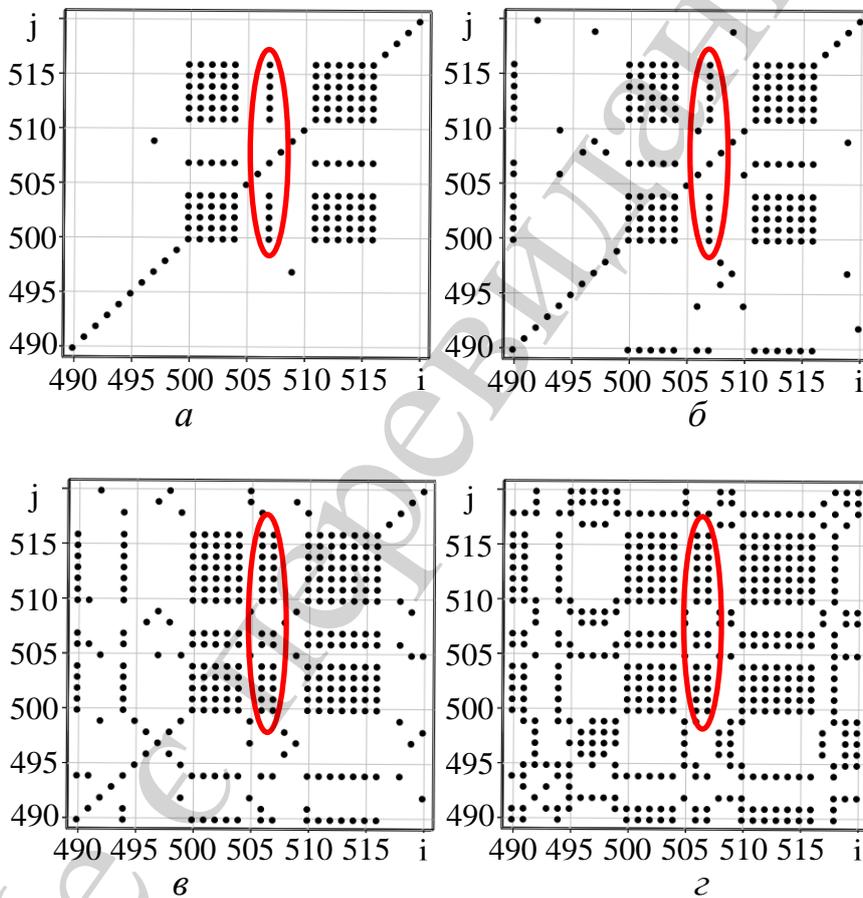


Рис. 5. RP загрязнений атмосферы на тестовом интервале при реализации полуадаптивной трансформации порога для различных значений допустимого угла конуса рекуррентности:  $a - \alpha=1^\circ$ ;  $b - \alpha=5^\circ$ ;  $в - \alpha=10^\circ$ ;  $г - \alpha=20^\circ$

На рис. 5 овалом красного цвета обозначена область рекуррентности на RP, отображающая наличие ламинарного состояния в атмосфере. Данное состояние характеризуется опасными превышениями ПДК по формальдегиду и аммиаку и соответствует 507 отсчету экспериментальных данных.

## 6. Обсуждение результатов экспериментальной проверки предложенного метода

Результаты измерения (рис. 1) динамики состояний превышения ПДК концентраций формальдегида (красная кривая), аммиака (синяя кривая) и оксида углерода (коричневая кривая) в атмосфере свидетельствуют о неодинаковом уровне загрязнений на рассматриваемом тестовом интервале. Наиболее опасным состоянием загрязнения атмосферы является промежуток между 504 и 511 отсчетами измерений (10-ти кратное превышение ПДК по формальдегиду и двукратное по аммиаку).

Экспериментальная проверка известного метода вычисления RP для фиксированного порога и различных метрик используемого нормированного пространства свидетельствует о неодинаковости структурных отображений, представленных на рис. 2, 3. При этом вид отображаемой структуры RP зависит от порога и метрики пространства. Следуя структурам на рис. 2, 3, при фиксированном пороге  $\varepsilon$  видно, что только в случае использования евклидовой метрики пространств RP позволяют интерпретировать рекуррентные состояния систем в смысле близости расстояний. Вертикальные и горизонтальные наборы черных точек на RP характерны для ламинарных состояний загрязненной атмосферы, когда концентрации загрязнений по разным причинам не рассеиваются атмосферой. Такие состояния считаются опасными и могут являться причиной многих чрезвычайных ситуаций отсроченного проявления. При этом следует отметить, что ламинарные состояния идентифицируются с различной степенью точности для всех рассмотренных метрик. Совокупность белых точек на RP характеризует отсутствие рекуррентности соответствующих состояний загрязненной атмосферы. Белые точки могут быть обусловлены возможной кратковременной потерей рекуррентности состояний с последующим переходом в ламинарное состояние или отсутствием регулярности измерений. В общем случае снижение фиксированного порога  $\varepsilon$  приводит к большей детализации структуры RP (чередованию черных и белых точек) для всех рассмотренных метрик.

RP вектора состояний загрязнений атмосферы на тестовом интервале (рис. 1) в усовершенствованном пространстве для различных значений фиксированного порога  $\varepsilon$  (рис. 4) свидетельствуют о совпадении структур RP для одинаковых значений порога при евклидовой метрике. Объясняется это тем, что используемая в (3) метрика эквивалентна евклидовой метрике при определении нормы в (1). При этом в вычислительном отношении определение нормы в (3) несколько проще по сравнению с (1). Важной особенностью представления нормы в (3) в усовершенствованном пространстве по сравнению с (1) является возможность реализации предлагаемого метода полуадаптивной масштабированной трансформации порога, которая отсутствует в случае (1).

Из анализа RP на рис. 5 и областей, отмеченных овалом красного цвета, следует, что в усовершенствованном пространстве при реализации предложенного метода удается достичь большей информативности и адекватности отображения реальным системам. Соотнеся результаты экспериментальных исследований с теоретической базой предложенного метода, выявлено, что метод обладает важным свойством отображать опасные состояния в динамических системах, ха-

рактируемые их ламинарными состояниями. При этом в случае атмосферных загрязнений не требуется информация о метеорологической обстановке. Установлено, что величина  $\alpha$  в случае реализации метода полуадаптивной трансформации порога оказывает влияние на точность отображения рекуррентных состояний, а также способность RP выявлять опасные состояния в различных динамических системах. Так, с уменьшением величины  $\alpha$  точность отображения RP реальных состояний динамических систем возрастает. Однако необходимо учитывать, что при  $\alpha=0$  рекуррентные состояния не будут отображаться в RP. Экспериментально установлено, что рабочие значения величины  $\alpha$  должны выбираться из интервала:  $1^\circ-5^\circ$ . При этом прямоугольные кластеры черных точек в RP на рис. 5 свидетельствуют о наличии соответствующих рекуррентных состояний. Однако не являются особенностями исследуемых атмосферных загрязнений, поскольку обусловлены особенностями используемой первичной обработки и соответствуют моментам отсутствия измерений. Кроме этого, в усовершенствованном пространстве для евклидовой метрики скалярное произведение векторов порождает трехпараметрические конические окрестности рекуррентности вместо традиционных однопараметрических сферических окрестностей. При этом парадигма трехпараметрической конической окрестности рекуррентности состояний меняет традиционную концепцию сферической рекуррентности на концепцию расширенной обобщенной рекуррентности. Введение трехпараметрических конических окрестностей позволило разработать метод полуадаптивной масштабной трансформации порога. При этом адаптация порога осуществляется к измеряемым векторам состояний системы, обеспечивая измерительную инвариантность RP. А угловой размер конуса рекуррентности состояний обеспечивает требуемую точность вычисления RP. Поэтому предлагаемый метод полуадаптивной масштабной трансформации порога обеспечивает вычисление RP, которые адекватны реальным динамическим системам.

Приложения на основе разработанного метода могут быть реализованы для раннего выявления опасных загрязнений приземного слоя атмосферы с целью использования в интеллектуальных системах управления городским транспортом при разработке систем поддержки принятия решений в условиях возможных предпосылок к чрезвычайным ситуациям и своевременного оповещения населения.

Возможным ограничением работы следует считать справедливость предположения о ненулевых значениях измеряемых векторов состояний исследуемой системы. Для нулевых векторов состояний, соответствующих обычно случаю отсутствия измерений, имеет место ложная рекуррентность состояний. При количественном анализе ложная рекуррентность является нежелательной. Поэтому устранение ложной рекуррентности может рассматриваться в качестве возможного направления развития работы.

## **7. Выводы**

1. Разработан метод полуадаптивной масштабной трансформации порога, обеспечивающий вычисление RP, адекватно отображающих рекуррентность состояний реальных динамических систем природной и технической сферы.

Новый научный результат состоит в развитии теоретической основы метода полуадаптивной масштабной трансформации порога при вычислении RP на основе усовершенствования линейных нормированных пространств. Разработанный метод полуадаптивной масштабной трансформации порога обеспечивает вычисление RP, обладающих повышенной информативностью, невысокой сложностью, инвариантностью к длине и размеру векторов состояний, возможностью применения в условиях нерегулярных измерений.

2. Проверка работоспособности предлагаемого метода полуадаптивной масштабной трансформации порога произведена на основе экспериментальных измерений концентраций формальдегида, аммиака и оксида углерода в атмосфере типового промышленного города при традиционных стационарных и подвижных источниках загрязнений. Полученные результаты вычисления RP с учетом предложенного метода в целом подтверждают его работоспособность. Установлено, что вычисление RP при полуадаптивной трансформации порога для различных угловых размеров  $\alpha$  конуса рекуррентности, равных  $1^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  и  $20^\circ$  свидетельствует о том, что с уменьшением угловых размеров  $\alpha$  конуса точность RP выявлять опасные состояния в динамических системах возрастает. Экспериментально установлено, что для адекватного отображения рекуррентных состояний реальных динамических систем, с помощью вычисляемых RP, значения величины  $\alpha$  должны составлять  $1-5^\circ$ .

### Литература

1. Webber, C. L., Marwan, N. (Eds.) (2015). Recurrence Quantification Analysis. Understanding Complex Systems. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07155-8>
2. Marwan, N., Webber, C. L., Macau, E. E. N., Viana, R. L. (2018). Introduction to focus issue: Recurrence quantification analysis for understanding complex systems. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 28 (8), 085601. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5050929>
3. Souza, E. G., Viana, R. L., Lopes, S. R. (2008). Using recurrences to characterize the hyperchaos-chaos transition. *Physical Review E*, 78 (6). doi: <https://doi.org/10.1103/physreve.78.066206>
4. Javorka, M., Trunkvalterova, Z., Tonhajzerova, I., Lazarova, Z., Javorkova, J., Javorka, K. (2008). Recurrences in heart rate dynamics are changed in patients with diabetes mellitus. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 28 (5), 326–331. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1475-097x.2008.00813.x>
5. Oya, S., Aihara, K., Hirata, Y. (2014). Forecasting abrupt changes in foreign exchange markets: method using dynamical network marker. *New Journal of Physics*, 16 (11), 115015. doi: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/11/115015>
6. Carrión, A., Miralles, R., Lara, G. (2014). Measuring predictability in ultrasonic signals: An application to scattering material characterization. *Ultrasonics*, 54 (7), 1904–1911. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.05.008>
7. Marwan, N. (2011). How to avoid potential pitfalls in recurrence plot based data analysis. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 21 (04), 1003–1017. doi: <https://doi.org/10.1142/s0218127411029008>

8. 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>
9. 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>
10. Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980*, 366–381. doi: <https://doi.org/10.1007/bfb0091924>
11. 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>
12. Adeniji, A. E., Olusola, O. I., Njah, A. N. (2018). Comparative study of chaotic features in hourly wind speed using recurrence quantification analysis. *AIP Advances*, 8 (2), 025102. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4998674>
13. Wendi, D., Marwan, N., Merz, B. (2018). In Search of Determinism-Sensitive Region to Avoid Artefacts in Recurrence Plots. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 28 (01), 1850007. doi: <https://doi.org/10.1142/s0218127418500074>
14. Donner, R. V., Balasis, G., Stolbova, V., Georgiou, M., Wiedermann, M., Kurths, J. (2019). Recurrence-Based Quantification of Dynamical Complexity in the Earth's Magnetosphere at Geospace Storm Timescales. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124 (1), 90–108. doi: <https://doi.org/10.1029/2018ja025318>
15. Garcia-Ceja, E., Uddin, M. Z., Torresen, J. (2018). Classification of Recurrence Plots' Distance Matrices with a Convolutional Neural Network for Activity Recognition. *Procedia Computer Science*, 130, 157–163. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.025>
16. Neves, F. M., Viana, R. L., Pie, M. R. (2017). Recurrence analysis of ant activity patterns. *PLOS ONE*, 12 (10), e0185968. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185968>
17. Ozken, I., Eroglu, D., Breitenbach, S. F. M., Marwan, N., Tan, L., Tirnakli, U., Kurths, J. (2018). Recurrence plot analysis of irregularly sampled data. *Physical Review E*, 98 (5). doi: <https://doi.org/10.1103/physreve.98.052215>
18. Schinkel, S., Dimigen, O., Marwan, N. (2008). Selection of recurrence threshold for signal detection. *The European Physical Journal Special Topics*, 164 (1), 45–53. doi: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2008-00833-5>
19. Eroglu, D., Marwan, N., Stebich, M., Kurths, J. (2018). Multiplex recurrence networks. *Physical Review E*, 97 (1). doi: <https://doi.org/10.1103/physreve.97.012312>
20. Oberst, S., Niven, R., Ord, A., Hobbs, B., Lester, D. (2017). Application of recurrence plots to orebody exploration data. Conference: Target. At University Club, University of Western Australia.

21. Webber, C. L., Ioana, C., Marwan, N. (Eds.) (2016). *Recurrence Plots and Their Quantifications: Expanding Horizons*. Springer Proceedings in Physics. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29922-8>

22. 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>

23. 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>

24. 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>

25. Beim Graben, P., Hutt, A. (2015). Detecting event-related recurrences by symbolic analysis: applications to human language processing. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373 (2034), 20140089. doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0089>

26. Mindlin, G. M., Gilmore, R. (1992). Topological analysis and synthesis of chaotic time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 58 (1-4), 229–242. doi: [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(92\)90111-y](https://doi.org/10.1016/0167-2789(92)90111-y)

27. Thiel, M., Romano, M. C., Kurths, J., Meucci, R., Allaria, E., Arecchi, F. T. (2002). Influence of observational noise on the recurrence quantification analysis. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 171 (3), 138–152. doi: [https://doi.org/10.1016/s0167-2789\(02\)00586-9](https://doi.org/10.1016/s0167-2789(02)00586-9)

28. Pospelov, B., Andronov, V., Meleshchenko, R., Danchenko, Y., Artemenko, I., Romaniak, M. et. al. (2019). Construction of methods for computing recurrence plots in space with a scalar product. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (4 (99)), 37–44. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.169887>

29. 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.

30. 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.

31. 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>

32. 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>

33. 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>

34. Vasyukov, A., Loboichenko, V., Bushtec, S. (2016). Identification of bottled natural waters by using direct conductometry. *Ecology, Environment and Conservation*, 22 (3), 1171–1176.

35. 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>

Не є перевиданням