

УДК 004.932

Б. Б. Поспелов¹, д.т.н., профессор, ведущий н.с. (ORCID 0000-0002-0957-3839)

Р. Г. Мелешенко¹, к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0001-5411-2030)

О. В. Прокопенко², нач. отдела (ORCID 0000-0002-8544-6313)

А. С. Мельниченко¹, препод. каф. (ORCID 0000-0002-3190-1990)

¹Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков, Украина

²Черкасский областной центр по гидрометеорологии, Черкассы, Украина

МЕРЫ РЕКУРРЕНТНОСТИ И МЕТОДИКА ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМ

Разработаны методы вычисления мер рекуррентности состояний и методика их использования для изучения и прогнозирования динамики состояния экосистем. Новый научный результат состоит в использовании модификации мер рекуррентности, базирующейся на динамическом оконном усреднении текущих мер рекуррентности состояний экосистем. Один тип усреднения использует нарастающую в реальном времени измерений ширину окна. Другой тип усреднения использует перемещаемое во времени измерений окно фиксированной ширины. Предложенные меры учитывают комплексный характер явных и скрытых дестабилизирующих факторов, влияющих на состояние экосистем. На основе модифицированных мер рекуррентности разработана методика изучения, а также прогнозирования состояния экологических систем в реальном времени наблюдения. Указанная методика позволяет оперативно выявлять не только явные, но и скрытые опасные состояния экосистем, повышая результативность и своевременность мероприятий по недопущению их влияния на население и окружающую среду. Разработана методика экспериментальных исследований для проверки разработанной методики на примере измерения концентраций двуокиси азота в атмосфере типовой городской конфигурации с индексом загрязненности 6,8 ед. Установлено, что динамика концентрации двуокиси азота в течение исследуемого интервала имеет фрактальную структуру, которая характеризуется элементами периодической и экстремальной топологий с резкими изменениями динамики. Это позволяет выявлять скрытые опасные состояния экосистем на примере загрязненности атмосферы. Установлено, что динамика модифицированных мер РС изменяется от нуля до 0,78. Получено, что текущие значения концентраций двуокиси азота превышали ПДК от 2,75 до 4,5 раз, а допустимые максимально разовые концентрации – в 1,3–2,1 раза. Установлено, что резкое изменение в динамике мер РС может использоваться в качестве индикатора скрытой экологической опасности, связанной с загрязнением атмосферного воздуха.

Ключевые слова: экосистема, мера рекуррентности, прогноз, рекуррентность состояний, рекуррентная диаграмма

1. Введение

Современный характер отрицательного воздействия на окружающую среду становится все более интенсивным и затрагивает основы существования человеческих и природных экосистем. Поэтому важным является изучение причин возникновения современного экологического кризиса, а также способов его недопущения. Для этого необходима правильная оценка экологического состояния, как природной среды, так и антропогенных систем, созданных человеком. Одной из важнейших экологических систем является город. Формирование города как особого типа среды обитания людей тесно связано с возрастанием степени отрицательного влияния на окружающую среду. В особой степени это касается выбросов различных вредных веществ в атмосферный воздух городов. В настоящее время именно город и состояние атмосферного воздуха в нем рассматривается в качестве одного из индикаторов наиболее значительного негативного экологического воздействия на человека и природы, а также явного и неявного возникновения различных чрезвычайных событий.

В связи со сложностью процессов загрязнения атмосферного воздуха городов изучение специфики современной экологической ситуации в городе требует комплексного подхода. Прежде это изучение динамики загрязняющих веществ в атмосфере по территории города с учетом сложного характера источников и ее прогнозирование, которые позволяют выявлять ряд важных причинно-следственных связей, определяющих возникновение возможных экологических опасностей, связанных с появлением чрезвычайных событий. Несмотря на существование большого числа различных методик оценки экологической опасности, актуальным остается проблема разработки новых мер количественного оценивания и методики их использования для изучения и прогнозирования динамики состояния экосистем.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Современные экосистемы представляют собой сложные системы, демонстрирующие диссипативность структуры, нелинейную динамику и самоорганизацию. В таких системах традиционные методы анализа могут не обнаруживать имеющиеся связи между элементами, поскольку базируются на линейности их взаимодействия, которое обычно нарушается [1]. Это приводит к некорректным представлениям о реальной динамике состояния экосистем. При этом понимание сложной динамики состояний экосистем имеет первостепенное значение для управления и недопущения опасных состояний в экосистемах [2]. В этой связи методы нелинейной динамики оценки состояния сложных систем при наличии шума, нестационарности и коротких рядах данных наблюдения являются активной областью исследований во многих дисциплинах [3].

Для исследования динамики состояния различных экосистем могут применяться нелинейные методы корреляционной размерности, Ляпунова и энтропии. Однако указанные методы основываются на достаточно длинных реализациях данных. Поэтому их применение в случае коротких реализаций данных, характерных для большинства реальных экосистем, часто приводит к некорректным результатам [4]. Для корректного изучения экосистем лучше всего использовать нелинейные подходы, не зависящие от заданных статистических распределений данных и применимые для коротких выборок данных, обычно маскируемых естественными шумами, переходными процессами и артефактами. Сегодня лишь анализ, основанный на рекуррентном поведении состояний экосистем, соответствует отмеченным выше требованиям [5].

Рекуррентное поведение состояний сложных систем принято отображать в виде рекуррентных диаграмм (RP) [6]. RP – это методы анализа данных, применяемые для визуализации траекторий динамических систем в фазовом пространстве [4]. RP позволяют судить о характере протекающих в сложной системе процессов, при наличии и влиянии шумов, дрейфа, рекуррентности и замираний состояний, совершении экстремальных событий, скрытой периодичности и цикличности. Количественный анализ RP сопоставляет диаграмме некоторые численные меры, основанные на плотности рекуррентности точек. При этом до настоящего времени не создано удовлетворительной теории количественных мер RP и их применения. Данный подход нуждается в дополнительных исследованиях, обусловленных не только сложностью и разнообразием динамики состояний экосистем, но и рядом ограничений экологического наблюдения [2].

В последнее время активно развиваются приложения методов теории

динамических систем к анализу различных типов экосистем [7, 8]. В теории динамических систем разработаны методы, позволяющие по одномерным данным наблюдений восстанавливать состояние всей системы. В частности, анализу временных рядов в геофизике посвящено немало работ, в том числе с позиции теории динамических систем и фрактальных множеств [8, 9]. Понимание принципов и механизмов, лежащих в основе динамики опасных состояний современных экосистем, тесно связано с прогрессом в области методов анализа сложных систем. Понятия, возникшие в области нелинейной динамики, такие как корреляционная размерность [10] или показатели Ляпунова [11], успешно используются для количественного анализа топологии фазового пространства и динамических свойств различных систем. Так, например, при изучении топологии используются фрактальные свойства [12, 13], информационные меры [14] и другие типы мер. Сегодня особое внимание уделяется изучению динамики сложных систем на основе мер рекуррентности состояний (РС) [6]. Отмечается, что свойство РС характерно для большинства реальных динамических систем и процессов вне зависимости от их природы.

Таким образом, РС являются одним из конструктивных методов для изучения динамики и выявления динамических паттернов во временных рядах реальных наблюдений [6]. В сочетании с методами количественного анализа РС они позволяют изучать и выявлять структурные особенности динамики состояний сложных систем, которые не могут быть выявлены с использованием классических методов [15]. Анализ РС рассматриваемых экосистем базируется на соответствующих мерах рекуррентности. Однако известные меры РС динамических систем остаются достаточно сложными и не в полной мере позволяют изучать и прогнозировать экологические опасные состояния. Поэтому важной и нерешенной частью проблемы разработки новых мер количественного оценивания и методики их использования для изучения и прогнозирования динамики состояния экосистем является развитие мер РС.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является развитие мер рекуррентности состояний и методику их использования для изучения и прогнозирования динамики состояния экосистем.

Для достижения цели работы были поставлены задачи:

- разработать методику расчета мер рекуррентности состояний с целью изучения и прогнозирования состояния экологических систем в реальном времени наблюдения;
- разработать методику экспериментальных исследований;
- экспериментально проверить предложенную методику изучения и прогнозирования динамики состояния экосистем на основе мер рекуррентности на примере реальных измерений загрязненности атмосферного воздуха типовой городской конфигурации.

4. Методика расчета мер рекуррентности состояний для изучения и прогнозирования состояния экологических систем

Под состоянием экосистемы в фазовом пространстве будем понимать либо наблюдаемые, либо ненаблюдаемые, но восстановленные по одному измеряемому параметру [16], все системные переменные. В большинстве практических задач

данные о возмущениях отсутствуют и единственной исходной информацией являются реальные измерения состояния исследуемой экосистемы, регистрируемые в дискретные моменты времени. Эта информация оказывается достаточной для изучения и прогнозирования динамики экосистем без привязки к их внутренней структуре. В общем случае такая информация в дискретный момент времени i 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 текущих состояний экосистемы; $\bar{\Delta}_i$ – вектор текущих возмущений; N_s – максимальное число регистрируемых данных (размер выборки дискретных данных).

В рассматриваемом случае метод RP [6] позволяет отображать траектории (1) в m -мерном фазовом пространстве на двумерную двоичную матрицу размером $N_s \times N_s$. При этом единичный элемент матрицы при некоторых моментах времени i и j соответствует РС, а координатные оси определяются осями дискретного времени измерения. Математически сказанное можно представить, следуя [15], соотношением

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

где $\Theta()$ – функция Хевисайда; ε – размер окрестности состояния \bar{z}_i в момент времени i , а $\|\cdot\|$ – знак определения нормы. Изучение динамики состояний различных сложных систем на основе (2) стало популярным благодаря появлению методов количественного анализа РС [6]. Такие методы основываются на соответствующих мерах измерения сложностей в RP, отображающих особые состояния исследуемых динамических систем. Однако большинство известных мер не позволяют их использовать для изучения и прогнозирования динамики опасных состояний экосистем. В ряде случаев известные меры обладают недостаточной оперативностью и оказываются недостаточно чувствительными к динамике опасных состояний, что ограничивает их применение для изучения и прогнозирования динамики опасных состояний экосистем.

Наиболее известной и распространенной является мера РС, определяемая на основе (2), величиной

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

Мера (3) позволяет рассчитывать плотность точек РС, подсчитывая их без учета линии идентичности в (2). В пределе при $N_s \rightarrow \infty$ мера (3) определяет вероятность РС для исследуемой экосистемы. Основным ограничением данной меры при изучении и прогнозировании опасных состояний экосистем является то, что она носит интегральный (кумулятивный) характер и поэтому не позволяет использовать ее для изучения и прогнозирования динамики опасных состояний экосистем. Поэтому вместо (3) с учетом (2) предлагается использовать меру, определяемую функционалом от величины ε и момента времени i , т. е. динамическую меру

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

Модификация (4) меры (3) позволяет рассчитывать динамическую плотность РС для текущего момента времени i с учетом размера ε окрестности состояний \bar{z}_i . Поэтому на основе меры (4) в принципе можно изучать и прогнозировать динамические опасные состояния экосистем в реальном времени. Однако следует заметить, что мера (4) при увеличении времени i регистрации данных снижает чувствительность к динамике опасных состояний из-за проявления ее кумулятивных особенностей. Кроме этого данная мера на начальном этапе в силу малой статистики регистрируемых данных обладает недостаточной точностью. Поэтому (4) обладает ограниченными возможностями, связанными с изучением и прогнозированием динамики опасных состояний реальных экосистем. С целью устранения указанных ограничений предлагается модифицировать (4) с помощью использования оконной меры (5) с движущимся окном размера a вдоль временной оси измерений. Для каждого момента i времени измерения оконная мера РС определяется величиной

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

Мера (5) позволяет рассчитывать динамическую плотность РС для текущего момента времени i с учетом размера ε окрестности состояний \bar{z}_i и заданного размера a движущегося окна. Данная мера является параметрической и зависит от параметров ε и a , которые должны выбираться из условия требуемой степени изучения и прогнозирования динамики опасных состояний экосистем. Мера (5), в отличие от (4), позволяет рассчитывать динамическую плотность РС для каждого момента i времени измеряемых данных, усредняемую в окне заданного размера a для величины окрестности ε . Это означает, что с ее помощью можно изучать динамику состояний различного типов экосистем. Динамическая плотность РС численно характеризует степень повторяемости различных состояний для текущего момента времени в исследуемых экосистемах и позволяет на ее основе изучать динамику ламинарных состояний, характерных динамических индикаторов возможных опасных состояний, при которых состояние экосистемы не изменяется или изменяется незначительно.

На основе рассмотренных мер (4) и (5) с использованием метода экспоненциальной фильтрации возможно по текущим наблюдениям до момента времени i осуществлять прогнозирование РС экосистем на момент $i+1$. При этом прогнозируемая величина РС экосистем будет определяться в соответствии с рекуррентным соотношением

$$U_{i+1} = \alpha u_i + (1 - \alpha) U_i, \quad (6)$$

где U_{i+1} – прогнозируемая мера РС (4) или (5) на момент $i+1$; U_i – прогнозируемая соответствующая мера РС в момент предшествующий

прогнозному; α – параметр сглаживания прогноза; y_i – фактическое значение соответствующей меры РС (4) или (5) в момент i времени измерения данных.

Таким образом, методика изучения и прогнозирования РС исследуемых экосистем основывается на реализации (6) с учетом использования при расчете в качестве y_i одной из текущих мер, определяемых $M_1(\varepsilon, i)$ или $M_2(i, a, \varepsilon)$ соответственно.

5. Методика экспериментальных исследований

Исследования проводились с целью экспериментальной проверки разработанной методики изучения и прогнозирования состояния экологических систем в реальном времени наблюдения на основе мер рекуррентности. В ходе эксперимента производились измерения концентраций атмосферных загрязнений в трех пунктах контроля 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 и городов Ровны, Черкассы и Львова в Украине (данные Центральной геофизической обсерватории им. Б.Срезневского в 2018 году).

Измерения концентраций газовых загрязнений атмосферы выполнялись с помощью портативного газоанализатора DRÄGER PAC 7000 (Германия). Газоанализатор обеспечивает требуемую надежность результатов измерений. Прибор позволяет измерять концентрации H_2S , O_2 , CO , CO_2 , Cl_2 , HCN , NH_3 , NO_2 , NO , PH_3 , SO_2 и других газов. При проведении исследований учитывалась современная тенденция перехода к контролю ограниченного набора важнейших загрязнителей атмосферы, которые нередко являются индикаторами более широкого спектра загрязняющих веществ в составе реальных выбросов. К важнейшим загрязнителям являются: взвешенные вещества (PM_{10} и $PM_{2.5}$), оксиды азота (NO_x), оксиды серы SO_2 и озон (O_3). Контроль взвешенных веществ обычно связан с обязательным наблюдением концентраций таких газообразных загрязнителей атмосферы городов, как NO , NO_2 , SO_2 , CO . При этом концентрация O_3 связана с концентрацией NO , NO_2 и $NM VOC$ (летучих органических соединений не метанового ряда). Учитывая это, а также особую опасность для человеческих и природных экосистем, в качестве основного загрязнителя атмосферы городов в эксперименте рассматривался NO_2 . Концентрации NO_2 измерялись в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.3.01-86 «Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов». Измерения проводились в течение месяца (31 день). Концентрации NO_2 измерялись в трех пунктах (А, В и С) типовой городской конфигурации. Координаты пунктов измерения определялись с использованием системы GPS (пункт А: 49.446361, 32.053106; пункт В: 49.407947, 32.093376; пункт С: 49.421643, 32.021621). Измерения концентрации двуокиси азота в трех пунктах местах измерялась в mg/m^3 . Измерения концентрации двуокиси азота в пунктах А, В и С производились 4 раза в сутки (01:00, 07:00, 13:00, 19:00). Для удобства обработки данных 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 методики, измеренные концентрации двуокиси

азота в зонах указанных пунктов контроля анализировались на ограниченном базовом временном интервале, который определялся с 01:00 4-го дня ($i=12$) по 01:00 13-го дня ($i=48$) эксперимента.

6. Результаты экспериментальной проверки методики изучения и прогнозирования динамики состояния экосистем на основе мер рекуррентности измерений загрязненности атмосферного воздуха типовой городской конфигурации

В качестве иллюстрации на рис. 1 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 $\varepsilon=0,01$.

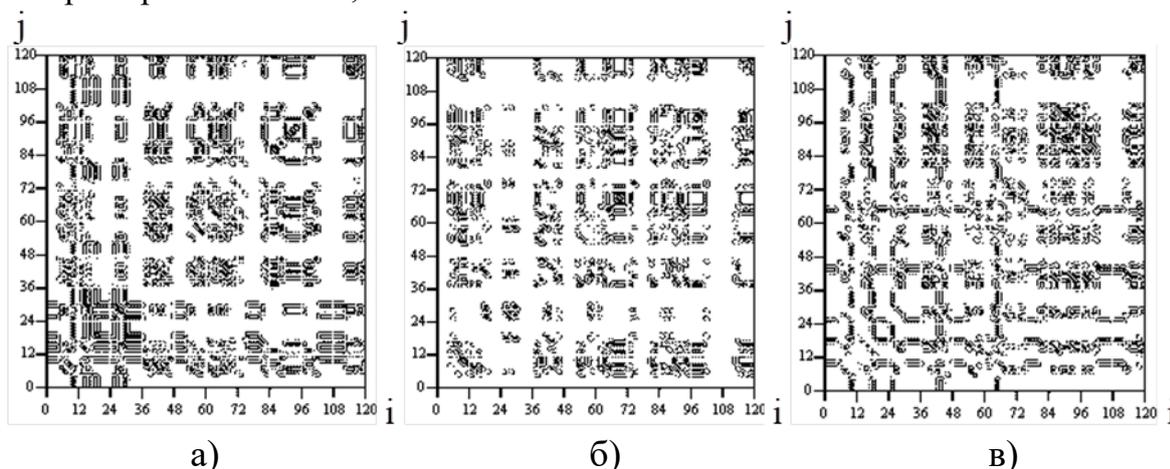


Рис. 1. Рекуррентные графики (2) для измеренной концентрации (мг/м^3) NO_2 в атмосферном воздухе типовой городской конфигурации в трех пунктах контроля: а) А; б) В; в) С

Динамика предложенной меры M_1 РС для концентрации двуокиси азота в атмосферном воздухе в трех пунктах контроля иллюстрируется на рис. 2.

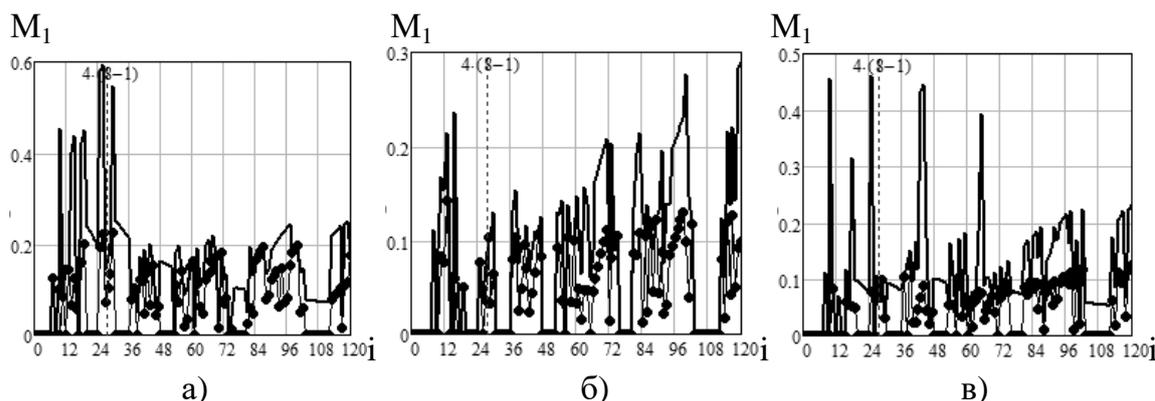


Рис. 2. Динамика меры M_1 РС для концентрации NO_2 в атмосферном воздухе в заданных пунктах контроля: а – А; б – В; в – С

При этом сплошные кривые соответствуют размеру окрестности $\varepsilon=0,01$, а точечные – $\varepsilon=0,001$. В зоне пункта контроля А типовой городской конфигурации загрязнения атмосферы в основном обуславливались заправками и автотранспортом. В зоне пункта контроля В находился молокозавод, деревообрабатывающий завод и крупное предприятие по производству

минеральных удобрений, ионообменных смол, капролактама и другой химической продукции. Пункт контроля С находился в центре города и загрязнения атмосферного воздуха обуславливались только автотранспортом.

Аналогичные зависимости для меры M_2 РС для концентрации двуокиси азота в атмосферном воздухе в трех пунктах контроля при использовании движущегося усредняющего окна размером 12 отсчетов представлены на рис. 3.

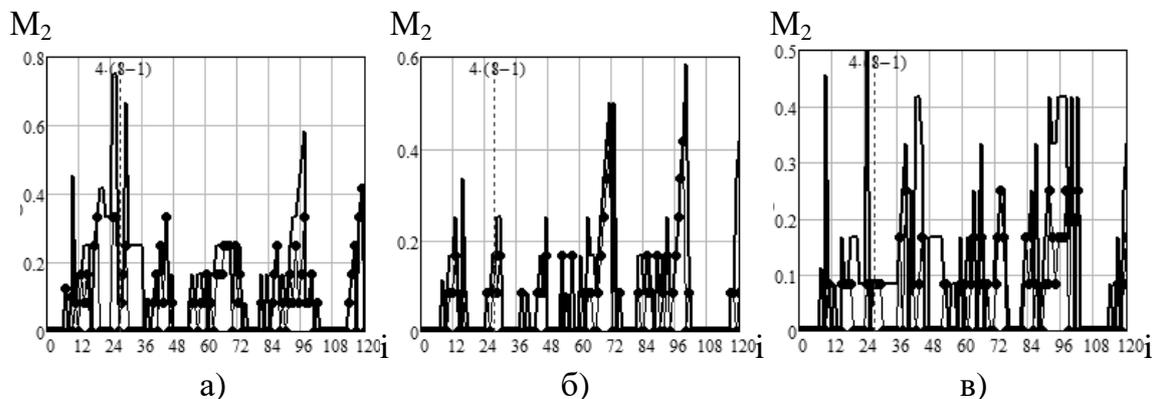


Рис. 3. Динамика меры M_2 РС для концентрации NO_2 в атмосферном воздухе в заданных пунктах контроля: а) А; б) В; в) С

На рис. 4 представлены результаты прогноза (6) РС концентрации двуокиси азота в атмосферном воздухе на один шаг (4 часа) в случае использования меры M_1 при $\varepsilon=0,01$ для различных пунктов контроля.

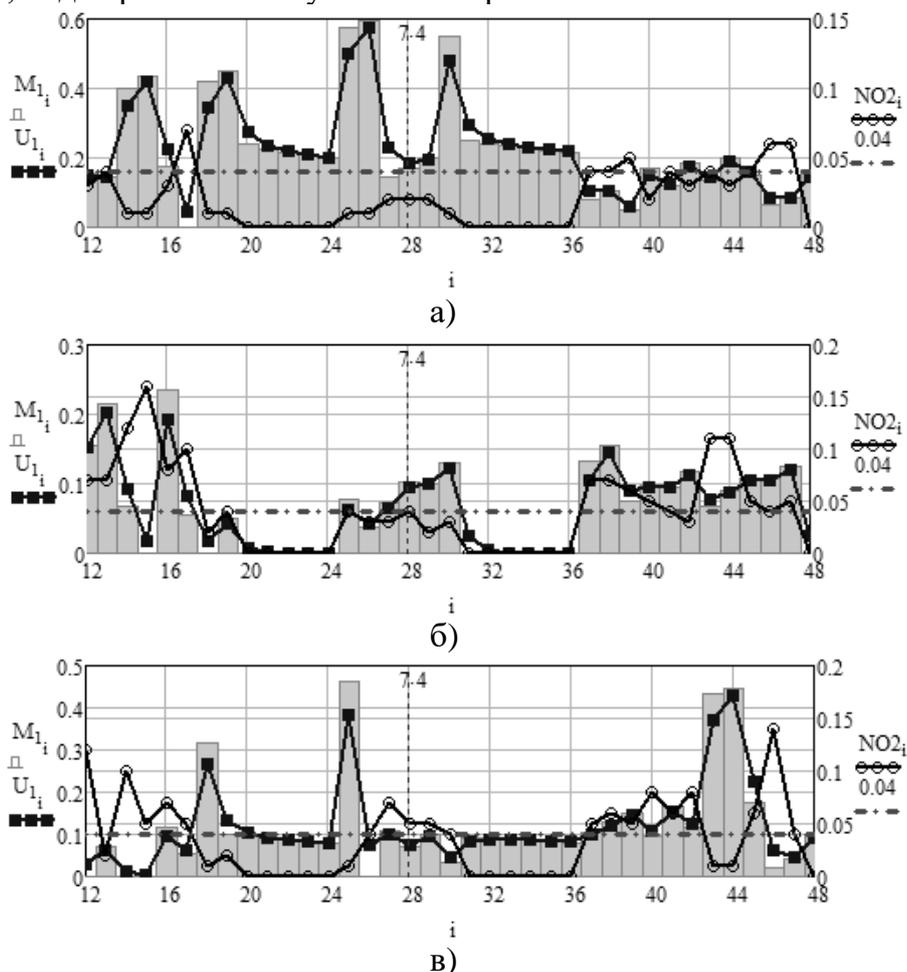


Рис. 4. Динамика меры M_1 РС, прогноза U_1 , концентрации двуокиси азота в атмосферном воздухе в заданных пунктах контроля и его ПДК: а) А; б) В; в) С

Аналогичные зависимости в случае предложенной меры M_2 приведены на рис. 5. Кроме этого на рис. 4 и рис. 5 в качестве сравнения приведена динамика концентрации двуокиси азота в атмосферном воздухе и его ПДК ($0,04 \text{ мг/м}^3$) для всех пунктов. При этом отсчет под номером 28 соответствовал возможному опасному состоянию на базовом интервале исследования.

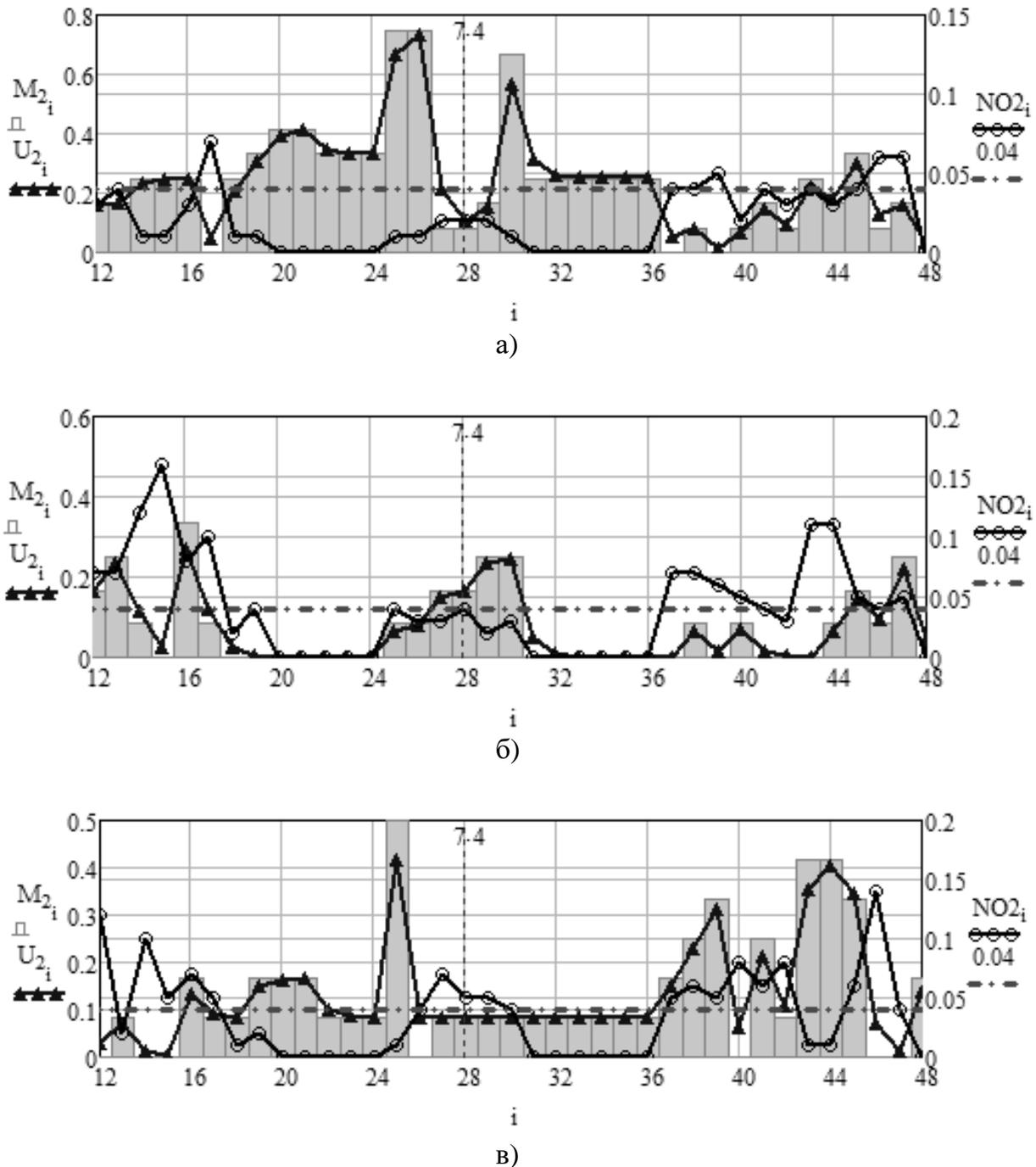


Рис. 5. Динамика меры M_2 РС, прогноза U_2 , концентрации двуокиси азота в атмосферном воздухе в заданных пунктах контроля и его ПДК: а) А; б) В; в) С

Сравнительная характеристика динамики прогнозов в соответствии с предложенными мерами РС для всех пунктов контроля в исследуемом промежутке времени представлена рис. 6.

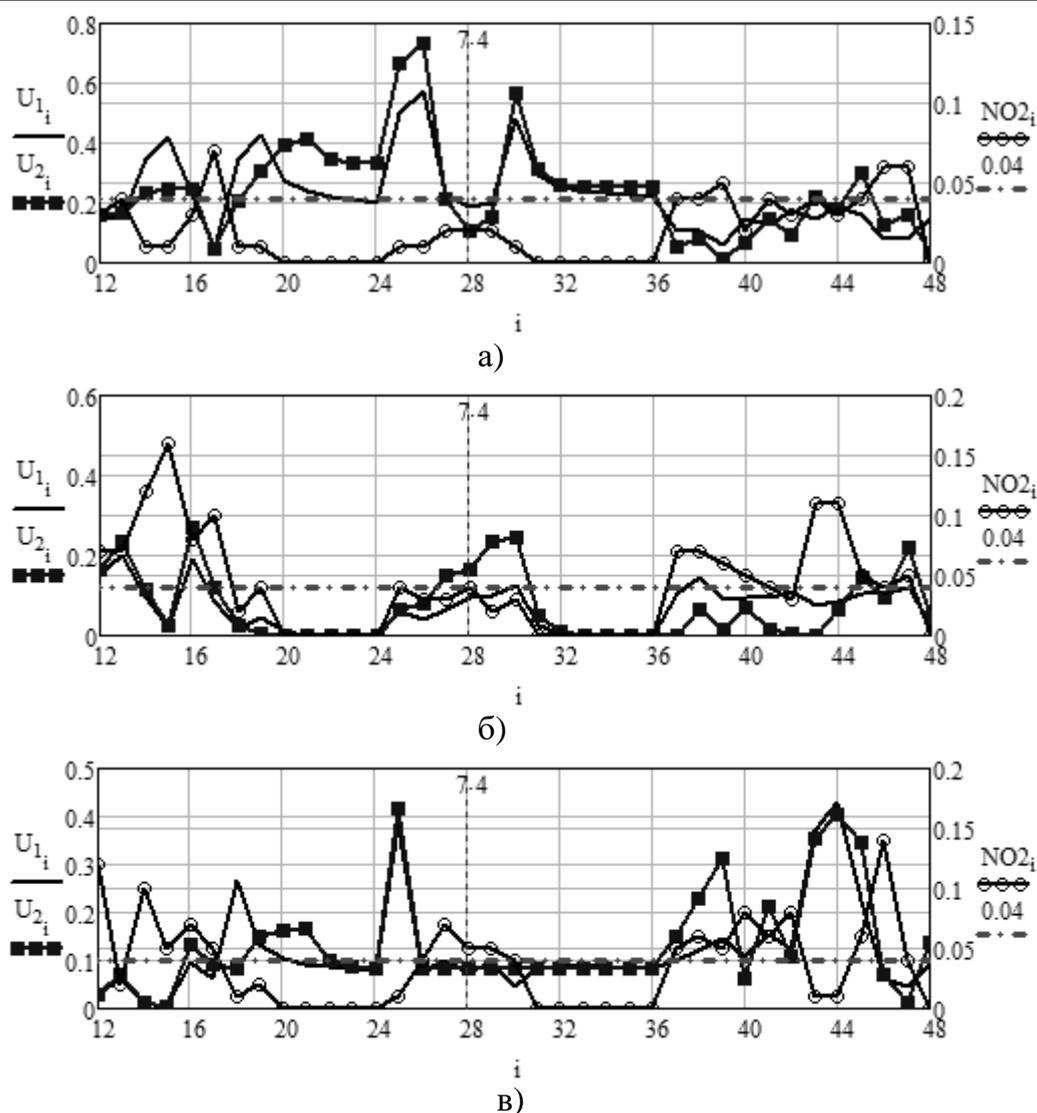


Рис. 6. Сравнительная характеристика динамики прогнозов в соответствии с предложенными мерами РС для всех пунктов контроля в исследуемом базовом интервале времени

7. Обсуждение результатов экспериментальной проверки методики изучения и прогнозирования динамики состояния экосистем

Анализ RP на рис. 1 показывает, что динамика состояния концентрации двуоксида 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 оказалась неодинаковой для рассматриваемых пунктов контроля и имеет различную топологию и текстуру РС. Прежде всего, характерны элементы периодической и экстремальных топологий с резкими изменениями в динамике концентрации NO_2 в воздухе. По виду RP проще выявлять экстремальные и редкие события, связанные с изучением загрязненности атмосферы. Анализ RP позволяет выявлять мелкомасштабные структуры, составленные из простых точек, диагональных, горизонтальных и вертикальных линий (рис. 1). Комбинации вертикальных и горизонтальных линий формируют прямоугольные кластеры рекуррентных точек. Вертикальные и горизонтальные

линии, определяемые (2) на рис. 1, 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 атмосфере. В таких состояниях отсутствует перемешивание между соседними слоями воздуха и соответственно замедляется или отсутствует вообще рассеивание загрязнителя в атмосфере, что приводит к сохранению или накоплению увеличению загрязнения. Указанные состояния могут использоваться в качестве индикаторов возможных скрытых опасностей загрязненности в атмосфере. При этом наличие нерегулярных черных и белых кластеров RP (рис. 1) свидетельствует о нерегулярности динамики загрязнения атмосферы двуокисью азота, которая может быть, обусловлена наличием корреляций. В наибольшей степени такое состояние в эксперименте характерно для пунктов контроля А в интервале, определяемом 12 – 36 отсчетами.

Анализ динамики меры M_1 PC для концентрации двуокиси азота в атмосферном воздухе в заданных пунктах контроля (рис. 2) свидетельствует о максимальной величине данной меры на интервале 12–36 отсчет для пунктов А и С, равной 0,6 и 0,48 соответственно. Аналогичная ситуация наблюдается и для меры M_2 (рис. 3). Максимальная величина меры PC M_2 составляет величину 0,78 и 0,5 для пунктов А и С соответственно. При этом в пункте контроля В значение меры PC для концентрации загрязнения NO_2 в указанном интервале не превышает 0,3. Достаточно высокое значение меры PC для концентраций загрязнения атмосферы NO_2 в пунктах контроля А и С свидетельствует о наличии значительной корреляции концентраций загрязнения. Малое значение меры PC для концентрации NO_2 в пункте контроля В означает меньшую корреляцию концентраций загрязнения.

Более подробный анализ предложенных мер PC и их прогноза на рис. 4 и рис. 5 показал, что перед началом опасного состояния (28 отсчет) имело место высокое значение PC , которое резко уменьшалось в момент 28 отсчета. Такая динамика PC объясняется резким переходом от ламинарного состояния в атмосфере (высокое значение PC) к состоянию потери устойчивости (низкое значение PC). При этом прогнозные значения PC повторяют характер динамики соответствующих мер PC . Следует заметить, что с точки зрения временной локализации и прогнозирования опасных состояний в экосистемах по динамике мер PC целесообразно использовать меру M_2 , которая обладает большими возможностями дифференциации опасных состояний.

8. Выводы

1. Разработана методика расчета мер рекуррентности (повторяемости) состояний для изучения и прогнозирования состояния экологических систем в реальном времени наблюдения. Новый научный результат состоит в модификации известных мер рекуррентности, направленной на повышение их оперативности, с целью возможности использования для текущего изучения и прогнозирования состояния экологических систем. Отличительная особенность модифицированных мер состоит в усреднении текущих значений рекуррентности состояний экологических систем в динамических окнах. Предлагаемые динамические окна имеют нарастающую в реальном времени измерений ширину

и фиксированную ширину движущегося окна. Важной особенностью указанных мер является комплексный учет различных явных и скрытых дестабилизирующих факторов, влияющих на текущее состояние экосистемы в пункте контроля. Разработанная методика позволяет оперативно выявлять не только явные, но и скрытые опасные состояния экосистем и повышать тем самым результативность и своевременность мероприятий по их недопущению и защите населения и окружающей среды.

2. Разработана методика экспериментальных исследований для проверки разработанной методики изучения и прогнозирования состояния экологических систем в реальном времени наблюдения на примере измерения концентраций атмосферных загрязнений в трех пунктах контроля типовой городской конфигурации. В качестве типовой выбиралась городская конфигурация с уровнем индекса загрязненности атмосферы порядка 6,8 ед. Измерения концентраций загрязнений атмосферы выполнялись с помощью портативного газоанализатора DRÄGER PAC 7000 (Германия). Учитывая мировые тенденции в области контроля состояния современных экосистем, а также особую опасность для человеческих и природных экосистем, в качестве основного загрязнителя в эксперименте рассматривалась двуокиси азота. Измерения в пунктах контроля производились 4 раза в сутки (01:00, 07:00, 13:00, 19:00). Для экспериментальной проверки методики, измерения концентрации двуокиси азота в пунктах контроля анализировались в течение базового временного интервала, определяемого с 01:00 4-го дня по 01:00 13-го дня.

3. В ходе экспериментальной проверки предложенной методики на примере реальных измерений загрязненности атмосферного воздуха типовой городской конфигурации установлено, что динамика концентрации двуокиси азота в атмосферном воздухе в течение исследуемого месяца имеет фрактальную структуру. Структура оказывается неодинаковой для различных пунктов контроля и характеризуется элементами периодической и экстремальных топологий с резкими изменениями динамики. Указанные особенности позволяют выявлять скрытые опасности загрязненности атмосферы. Динамика предложенных мер РС на базовом интервале меняется от нуля до 0,78. Показано, что максимальные значения мер РС принадлежат базовому интервалу, определяемому 12–36 отсчетами в пунктах А и С. Установлено, что в рассматриваемых пунктах текущие значения концентраций двуокиси азота превышали ПДК от 2,75 до 4,5 раз, а допустимые максимально разовые концентрации – в 1,3–2,1 раза. При этом резкое изменение в динамике мер РС от их высоких значений к низким значениям и обратно может использоваться в качестве индикатора скрытой экологической опасности, связанной с загрязнением атмосферного воздуха городов. Отмечается, что с точки зрения временной локализации экологической опасности следует использовать меру M_2 , обладающую большими возможностями.

Литература

1. Pascual M., Ellner, S. P. Linking ecological patterns to environmental forcing via nonlinear time series models // *Ecology*. 2000. V. 81(10). P. 2767–2780.
2. Parrott L. Analysis of simulated long-term ecosystem dynamics using visual recurrence analysis // *Ecological Complexity*. 2004. V. 1(2). P. 111–125.

3. Proulx R. Ecological complexity for unifying ecological theory across scales: a field ecologist's perspective // *Ecological complexity*. 2007. V. 4. P. 85–92.
4. Kantz H., Schreiber, T. *Nonlinear time series analysis* // Cambridge University Press. 2003. 365 p.
5. Marwan N., Schinkel, S., Kurths, J., *Recurrence Plots 25 Years Later – Gaining Confidence In Dynamical Transitions*, EPL. 2013. 101. 20007.
6. Webber Jr. C. L., Zbilut, J. P. *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences*. 2005. 26 p.
7. Pospelov B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych, P. Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. V. 3(93). № 9. P. 34–40.
8. Poulsen A., Jomaas, G. Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings // *Fire Technology*. 2012. № 48. P. 419–439.
9. Pospelov B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Gornostal, S. Analysis of correlation dimensionality of the state of gaseous medium at the early ignition of materials // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. V. 5(95). № 9. P. 34–40.
10. Grassberger P., Procaccia, I. Measuring the strangeness of strange attractors // *Physica*. 1983. № 9. P. 189–208.
11. Wolf A., Swift, J. B., Swinney, H. L., Vastano, J. A. Determining Lyapunov exponents from a time series // *Physica*. 1985. № 16. P. 285–317.
12. Marwan N., Kurths, J., Saparin, P. Generalised recurrence plot analysis for spatial data // *Phys. Lett.* 2007. № 360. P. 545–551.
13. Dombardi E., Timarr, G., Bada, G., Cloetingh, S., Horvath, F. Fractal dimension estimations of drainage network in the Carpathian-Pannonian system // *Global and Planetary Change*. 2007. № 58. P. 197–213.
14. Schirdewan A., Gapelyuk, A., Fischer, R., Koch, L., Schütt, H., Zacharowsky, U., Dietz, R., Thierfelder, L., Wessel, N. Cardiac magnetic field map topology quantified by Kullback-Leibler entropy identifies patients with hypertrophic cardiomyopathy // *Chaos*. 2007. V. 17. № 1. P. 015118.
15. Mandelbrot B. *Fraktalnaya geometriya prirody* // Institut kompyuternykh issledovaniy. 2002. V. 656. P. 12.
16. Packard N. H., Crutchfield J. P., Farmer J. D., Shaw R. S. Geometry from a time series // *Phys. Rev. Lett.* 1980. № 45. P. 712–716.

Б. Б. Поспелов¹, д.т.н., професор, провідн. н.с.

Р. Г. Мелешенко¹, к.т.н., доц. каф.

О. В. Прокопенко², нач. відділу

А. С. Мельниченко¹, викл. каф.

¹Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

²Черкаський обласний центр з гідрометеорології, Черкаси, Україна

МІРИ РЕКУРЕНТНОСТІ І МЕТОДИКА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ СТАНУ ЕКОСИСТЕМ

Розроблено методи обчислення мір рекурентності станів і методика їх використання для вивчення і прогнозування динаміки стану екосистем. Новий науковий результат полягає в використанні модифікації мір рекурентності, що базується на динамічному віконному усередненні поточних мір рекурентності станів екосистем. Один тип усереднення використовує наростаючу в реальному часі вимірювань ширину вікна. Інший тип усереднення використовує переміщене в часі вимірювань вікно фіксованої ширини. Запропоновані міри враховують комплексний характер яв-

них і прихованих дестабілізуючих факторів, що впливають на стан екосистем. На основі модифікованих мір рекурентності розроблена методика вивчення, а також прогнозування стану екологічних систем в реальному часі спостереження. Зазначена методика дозволяє оперативно виявляти не тільки явні, але і приховані небезпечні стани екосистем, підвищуючи результативність і своєчасність заходів щодо недопущення їх впливу на населення та навколишнє середовище. Розроблено методику експериментальних досліджень для перевірки розробленої методики на прикладі вимірювання концентрацій двоокису азоту в атмосфері типової міської конфігурації з індексом забрудненості 6,8 од. Встановлено, що динаміка концентрації двоокису азоту протягом досліджуваного інтервалу має фрактальну структуру, яка характеризується елементами періодичної і екстремальної топологій з різкими змінами динаміки. Це дозволяє виявляти приховані небезпечні стани екосистем на прикладі забрудненості атмосфери. Встановлено, що динаміка модифікованих мір РС змінюється від нуля до 0,78. Отримано, що поточні значення концентрацій двоокису азоту перевищували ГДК від 2,75 до 4,5 раз, а допустимі максимально разові концентрації—в 1,3–2,1 рази. Встановлено, що різка зміна в динаміці мір РС може використовуватися в якості індикатора прихованої екологічної небезпеки, пов'язаної з забрудненням атмосферного повітря.

Ключові слова: екосистема, міра рекурентності, прогноз, рекурентність станів, рекурентна діаграма

B. Pospelov¹, DSc, Professor, Chief Researcher

R. Meleschenko¹, PhD, Associate Professor of the Department

O. Prokopenko², Head of Department

A. Melnichenko¹, Lecturer of the Department

¹*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

²*Cherkassy Regional Center for Hydrometeorology, Cherkassy, Ukraine*

RECURRENT MEASURES AND METHOD OF THEIR USE FOR THE STUDY AND FORECASTING OF THE DYNAMICS STATE OF ECOSYSTEMS

Methods for calculating recurrence measurements and methods of their use were developed in the current article. The main purposes of application these methods are predicting dynamics of ecosystems states. The new scientific result is the use of some modifications of recurrence measures based on dynamic window averaging of current recurrence measures of ecosystem states. One type of averaging uses the width of a window that increases in real time. The other type of averaging uses a fixed-width window that moves along the timeline. The proposed measures take into account the complex nature of overt and covert destabilizing factors affecting the state of ecosystems. Based on modified recurrence measures, a real-time monitoring technique for studying, as well as, predicting ecological systems has been developed. This technique allows you to identify quickly not only obvious, but also hidden dangerous conditions of ecosystems, increases effectiveness and timeliness of preventing measures against their impact on the population and the environment. The method for experimental studies was developed in order to test the developed method with the example of measuring nitrogen dioxide concentrations in the atmosphere of a typical urban configuration with a pollution index of 6.8 units. It has been determined that the dynamics of nitrogen dioxide concentration during the studied interval has a fractal structure, which is characterized by elements of periodic and extreme topologies with sharp changes in dynamics. This makes possible to identify hidden dangerous states of ecosystems with the example of atmospheric pollution. It has been ascertained that the dynamics of the modified RS measures vary from zero to 0.78. It was found that the current values of nitrogen dioxide concentrations exceeded the MPC from 2.75 to 4.5 times, and the maximum allowable one-time concentrations—by 1.3–2.1 times. It has been established that a dramatic change in the dynamics of RS measures can be used as an indicator of the hidden environmental hazard associated with air pollution.

Keywords: ecosystem, measure of recurrence, forecast, state recurrence, recurrent diagram

References

1. Pascual, M., Ellner, S. P. (2000). Linking ecological patterns to environmental forcing via nonlinear time series models. *Ecology*, 81(10), 2767–2780.
2. Parrott, L. (2004). Analysis of simulated long-term ecosystem dynamics using visual recurrence analysis. *Ecological Complexity*, 1(2), 111–125.

3. Proulx, R. (2007). Ecological complexity for unifying ecological theory across scales: a field ecologist's perspective. *Ecological complexity*, 4, 85–92.
4. Kantz, H., Schreiber T. (2003). *Nonlinear time series analysis*. Cambridge University Press, 365.
5. Marwan, N., Schinkel, S., Kurths, J. (2013). Recurrence Plots 25 Years Later – Gaining Confidence In Dynamical Transitions, *EPL*, 101, 20007.
6. Webber, Jr., C. L., Zbilut, J. P. (2005). *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences*, 26.
7. 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.
8. Poulsen, A., Jomaas, G. (2012). Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings. *Fire Technology*, 48, 419–439.
9. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Gornostal, S. (2018). Analysis of correlation dimensionality of the state of gaseous medium at the early ignition of materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (95), 9, 34–40.
10. Grassberger, P., Procaccia, I. (1983). Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica*, 9, 189–208.
11. Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L., Vastano, J. A. (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica*, 16, 285–317.
12. Marwan, N., Kurths, J., Saperin, P. (2007). Generalised recurrence plot analysis for spatial data. *Phys. Lett.*, 360, 545–551.
13. Dombrradi, E., Timarr, G., Bada, G., Cloetingh, S., Horvrath, F. (2007). Fractal dimension estimations of drainage network in the Carpathian-Pannonian system. *Global and Planetary Change*, 58, 197–213.
14. Schirdewan, A., Gapelyuk, A., Fischer, R., Koch, L., Schütt, H., Zacharowsky, U., Dietz, R., Thierfelder, L., Wessel, N. (2007). Cardiac magnetic field map topology quantified by Kullback-Leibler entropy identifies patients with hypertrophic cardiomyopathy. *Chaos*, 17(1), 015118.
15. Mandelbrot, B. (2002). *Fraktalnaya geometriya prirody*. Institut kompyuternykh issledovaniy, 656, 12.
16. Packard, N. H., Crutchfield, J. P., Farmer, J. D., Shaw, R. S. (1980). Geometry from a time series. *Phys. Rev. Lett.*, 45, 712–716.

Надійшла до редколегії: 16.01.2019

Прийнята до друку: 12.02.2019