

УДК 502.55:031.1

**Звягинцева А.В.**, канд. техн. наук, доцент  
**Аверин Г.В.**, д-р техн. наук, профессор  
 (ГВУЗ «ДонНТУ»)

**МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
 АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
 ВЕРОЯТНОСТЕЙ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ СОБЫТИЙ**

**Звягінцева А.В.**, канд. техн. наук, доцент  
**Аверін Г.В.**, д-р техн. наук, професор  
 (ДВНЗ «ДонНТУ»)

**МЕТОД КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЗАБРУДНЕННЯ  
 АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ ВИЗНАЧЕННЯ  
 ЙМОВІРНОСТІ НЕСПРИЯТЛИВИХ ПОДІЙ**

**Zviagintseva A.V.**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor  
**Averin G.V.**, Dr. Sc. (Tech.), Professor,  
 (Donetsk National Technical University)

**A COMPLEX METHOD FOR ASSESSING ATMOSPHERE AIR  
 POLLUTION BASING ON ADVERSE EVENT PROBABILITIES**

**Аннотация.** Предложен метод комплексной оценки загрязнения атмосферного воздуха, основанный на алгоритмическом определении статистических вероятностей сложных событий, характеризующих загрязнение окружающей среды. Основная гипотеза исследования связана с возможностью создания феноменологических моделей процессов, отличающихся многомерным полевым представлением массивов опытных данных, а также существованием скалярного поля статистической вероятности совместных событий, отражающих уровень загрязнения воздушной среды. В предлагаемом методе, в отличие от существующих, используется объективный подход и не применяются экспертные зависимости для оценки. Дан пример комплексной оценки загрязнения городов Украины на основе данных наблюдений Украинского гидрометеоцентра в период с 2003 по 2012 годы. Выполнена оценка рангов городов по уровню загрязнения атмосферного воздуха.

**Ключевые слова:** комплексная оценка, загрязнение среды, неблагоприятные события, статистические вероятности

**Введение.** Качество атмосферного воздуха является одной из важнейших характеристик среды, определяющей здоровье населения и состояние экосистем. В первую очередь, это обусловлено уровнем содержания в воздухе загрязняющих веществ. Систематическая оценка загрязнения атмосферы в Украине осуществляется по данным наблюдений, которые проводятся гидрометеорологической службой страны в 53 городах страны на 163 стационарных постах наблюдения. В атмосферном воздухе городов определяется содержание 31-ой загрязняющей примеси, включая восемь тяжелых металлов и бенз(а)пирен.

Основной объем определений приходится на вещества, которые имеют наибольшее распространение: пыль, диоксид серы, диоксид азота, оксид углерода, формальдегид. В ряде городов лаборатории Украинского гидрометеоцентра

контролируют содержание фенола, аммиака, сероводорода, фтористого и хлористого водорода, сажи и т.д. Ежегодно загрязнение воздуха по комплексному индексу загрязнения атмосферы (КИЗА) в 5 – 6 городах Украины классифицируется как чрезвычайно опасное и в 15 – 20 городах как опасное.

Комплексная оценка загрязнения атмосферного воздуха осуществляется на основе данных наблюдений с использованием различных подходов, в основу которых положены преимущественно экспертные методы. Существенным недостатком таких методов является выраженный субъективный подход исследователей к формированию расчетных методов и зависимостей.

Анализ множества работ в области изучения качества атмосферного воздуха показывает, что, несмотря на особую актуальность данного направления исследований, задача разработки объективных вероятностных методов оценки опасности, связанной с загрязнением воздуха, исследователями никогда не ставилась. Алгоритмическое определение вероятностей совместных неблагоприятных событий с использованием уже накопленных массивов данных наблюдений, характеризующих загрязнение окружающей среды, позволяет поставить и решить такую задачу.

**Существующие комплексные индексы для оценки загрязнения атмосферы.** Сегодня в разных странах мира разработано несколько десятков индексов для комплексной оценки качества атмосферного воздуха [1]. Так, например, в странах СНГ для соответствующей оценки широко используется комплексный индекс загрязнения атмосферы [2]

$$\hat{E}\hat{E}\hat{C}\hat{A} = \sum_{i=1}^n (z_i / \hat{I}\hat{A}\hat{E}_{\hat{n},\hat{n}})^{\beta_i}, \quad (1)$$

где  $\hat{E}\hat{E}\hat{C}\hat{A}$  – комплексный индекс загрязнения атмосферы;  $n$  – число загрязняющих атмосферу веществ, учитываемых при определении индекса (обычно 5),  $z_i$  – осредненная по времени (месяц или год) концентрация  $i$ -ой примеси в воздухе;  $\beta_i$  – показатель вредности  $i$ -ой примеси, зависящий от класса опасности вещества. Значение показателя  $\beta_i$  для веществ первого класса опасности (чрезвычайно опасные) равно 1,7; для второго (высоко опасные) – 1,3; третьего (умеренно опасные) – 1,0; четвертого (малоопасные) – 0,9. КИЗА, как интегральный показатель, определяет не абсолютный, а относительный уровень загрязнения атмосферного воздуха изучаемой местности. Согласно принятой классификации по показателю КИЗА выделяют четыре категории опасности: класс нормы ( $\hat{E}\hat{E}\hat{C}\hat{A} \leq 5$ ) соответствует уровню загрязнения воздуха ниже среднего по городам страны, класс риска равен среднему значению ( $5 < \hat{E}\hat{E}\hat{C}\hat{A} \leq 8$ ), класс кризиса означает превышение среднего уровня ( $8 < \hat{E}\hat{E}\hat{C}\hat{A} \leq 15$ ) и класс бедствия – его значительное превышение ( $15 < \hat{E}\hat{E}\hat{C}\hat{A} \leq 8$ ).

В зарубежных странах для динамического контроля в основном применяются индексы качества атмосферного воздуха (AQI – Air Quality Index), имеющие

бальную оценку в диапазоне от 0 до 500 условных единиц. Шкала AQI разделена на 7 категорий, соответствующих определенному диапазону концентраций и степени выраженности вредных эффектов. С 2005 года для оценки конкретных рисков для здоровья населения, вызванных загрязнением воздуха, в ряде западных стран стали использовать Air Quality Health Index – AQHI [1].

Процедура оценки качества атмосферного воздуха в странах Евросоюза регулируется Директивой Совета 96/62/ЕС. Оценка качества атмосферного воздуха, согласно директивам Евросоюза, – это целый комплекс процедур, включая зонирование территории, критерии размещения пунктов наблюдений, отчетность и т.д. В то же время во многих странах Евросоюза широко используются интегральные показатели оценки загрязнения воздушной среды. Например, во Франции для оценки загрязнения атмосферного воздуха используется индекс АТМО, который рассчитывается по содержанию четырех загрязняющих веществ: диоксида серы, диоксида азота, озона и взвешенных частиц ( $ВЧ_{10}$ ). Для каждого из загрязнителей определяется первичный индекс, а индекс загрязнения атмосферы за день рассчитывается путем суммирования самых высоких первичных индексов.

Для оценки опасности, связанной с загрязнением атмосферного воздуха, в разных странах мира применяются также и другие комплексные индексы (ПЗ, ПЗА, P, Z, Q, HI, H и т.д.), однако останавливаться на них подробно в данной статье не будем – они детально рассмотрены в работах [1, 2, 3].

**Постановка задачи.** Целью исследований является разработка нового метода комплексной оценки качества атмосферного воздуха на основе определения вероятностей неблагоприятных событий, связанных с превышением концентраций вредных веществ выше допустимых норм. Данный метод относится к объективным средствам анализа данных, так как не применяет экспертные подходы. Информационная основа метода состоит в использовании данных наблюдений о загрязнении воздуха в городах, представленных в виде таблично-временных массивов информации. Обычно такие данные имеют структуру таблиц в виде матриц «города – показатели загрязнения воздуха», причем таблицы упорядочены по годам. Исходя из сказанного выше, для определенного объекта каждый показатель в таблично-временном массиве данных будет представлен временным рядом из опытных точек, которые задаются с лагом в один год. Состояние загрязнения атмосферы городов изменяется с течением времени, то есть осуществляется некоторый динамический процесс. Данный подход позволяет определить экологическое состояние каждого объекта (города, района, территории) совокупностью наблюдаемых показателей загрязнения воздуха в заданный момент времени.

По данным наблюдения для всех объектов возможно определение статистических вероятностей сложных событий, связанных с загрязнением атмосферного воздуха. Определить эту статистическую вероятность можно алгоритмически для каждой таблицы данных.

Методикой исследований предусматривается использование феноменологических методов для анализа данных Украинского гидрометеоцентра за 2003 –

2012 годы по всем контролируемым вредным веществам (53 города Украины, около 50 тыс. данных), а также сравнение уровня загрязнения воздуха с действующими нормами. Структура данных имеет вид: город – показатели загрязнения атмосферы вредными веществами (пыль, диоксиды серы и азота, оксид углерода, формальдегид, бенз(а)пирен и т.д., всего 15 основных показателей).

На основе данных опыта определяются все неблагоприятные события, после чего рассматриваются совместные события одновременного наблюдения показателей загрязнения воздуха. Далее для таких событий алгоритмически определяются статистические вероятности и строится феноменологическая модель данных о загрязнении воздуха с помощью метода, который описан ниже.

**Феноменологический метод анализа загрязнения атмосферы.** Предположим, что в таблично-временных массивах данных содержится количественная информация о концентрациях в атмосферном воздухе  $n$  загрязняющих веществ  $z_1, z_2, \dots, z_n$ . Любое множество  $n$  переменных для параметров свойств задает  $n$ -мерное пространство  $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ , являющееся декартовым произведением областей значений всех переменных  $z_k$  данного множества. Точки этого пространства соответствуют  $n$ -мерным наборам значений всех переменных  $(z_1, z_2, \dots, z_n)$ . Состояние любого объекта (города) в  $n$ -мерном пространстве в каждый момент времени будет отображаться многомерной точкой  $M = M(z_1, z_2, \dots, z_n)$ , процесс изменения состояния объекта во времени – многомерной кривой, которая описывается точкой  $M$  в этом пространстве.

Таким образом, на основе переменных  $z_1, z_2, \dots, z_n$  формируем  $n$ -мерное пространство координат  $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ , в котором возможные состояния системы образуют некоторую область  $\Omega_n$ , охватывающую все наблюдаемые в опыте точки. Каждой опытной точке  $M_i$  можно поставить в соответствие некоторую вероятность характерных сложных событий  $w_i$ .

Рассмотрим сложное совместное событие  $A_i$  одновременного наблюдения нескольких показателей и определим, что состояние изучаемого объекта в заданный момент времени будет характеризоваться не только совокупностью показателей  $(z_{1i}, z_{2i}, \dots, z_{ni})$ , отображающихся точкой  $M_i$ , но и данным наблюдаемым событием. Будем считать, что существует вероятность данного события, которая может быть определена. Назовем данную статистическую вероятность вероятностью состояния изучаемой системы, которая включает все наблюдаемые объекты. Статистические вероятности для сложного события  $A_i$  одновременного наблюдения  $n$  заданных параметров могут быть найдены с использованием алгоритмов перебора, группировки и подсчета частот благоприятных событий в общей выборке всех наблюдений [4, 5]. Неблагоприятным событием  $A_i$  будем считать событие, для которого хотя бы одна наблюдаемая концентрация  $z_1, z_2, \dots, z_n$  превышает установленные нормы, например, предельно допустимую концентрацию загрязняющего вещества в атмосферном воздухе.

В процессе группировки данных статистическая вероятность состояния оп-

ределяется путем разбиения всей наблюдаемой области  $\Omega_n$  на  $n$ -мерные параллелепипеды, исходя из заданного количества (обычно одинакового) интервалов группирования для каждой переменной  $z_k$ , и определения относительных частот событий. Относительные частоты равны отношению количества опытных точек, которые попадают в определенные  $n$ -мерные параллелепипеды, к общему числу всех наблюдаемых точек. Соответствующий скрипт для определения вероятности состояния системы приведен в работе [4].

Основная фундаментальная гипотеза, которая принимается при построении моделей данных, состоит в том, что мы предполагаем непрерывность области  $\Omega_n$ . Это означает, что в пространстве состояний  $\Omega_n$  существует бесконечное множество состояний для некоторой генеральной совокупности объектов системы и точки состояний  $M(z_1, z_2, \dots, z_n)$  непрерывно заполняют это пространство. Будем также считать, что опытные точки  $M_i(z_1, z_2, \dots, z_n)$  являются ограниченной выборкой наблюдений из данной генеральной совокупности.

Второй фундаментальный аспект заключается в принятии гипотезы существования вероятности состояния системы, определенной для некоторого характерного события. Для построения моделей количественных данных принимаем гипотезу о непрерывности поля вероятности состояния в области  $\Omega_n$ . Все сказанное выше позволяет сформулировать следующие гипотезы.

1. Пусть в пространстве состояний системы  $\Omega_n$  каждой точке  $M$  поставлено в соответствие действительное число  $w$  ( $0 \leq w \leq 1$ ), которое будем называть статистической вероятностью состояния системы.

2. Величина  $w(M)$  является функцией точки и образует скалярное поле, которое является непрерывным в области  $\Omega_n$ .

Для построения модели описания динамических процессов предположим, что скалярное поле величины  $w$  может быть аналитически описано в окрестности произвольной точки  $M$ . Будем считать, что вблизи точки  $M$  осуществляется процесс изменения состояния некоторого объекта. Для задания скалярного поля  $w = w(M)$  как функции независимых переменных  $z_1, z_2, \dots, z_n$  необходимо определить функцию точки. Предположим, что в области  $\Omega_n$  можно задать аналитическую непрерывную функцию  $\theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$ , на основе которой будет формироваться математическая модель. При известном виде функции  $\theta$  и значениях переменных  $z_1, z_2, \dots, z_n$  в области  $\Omega_n$  можно построить еще одно скалярное поле, которое является основой модели. Поэтому, для построения феноменологической модели изучаемых данных сформулируем гипотезу.

3. Пусть в пространстве состояний некоторой системы  $\Omega_n$  скалярные поля величин  $w$  и  $\theta$  однозначно связаны между собой. Если в окрестности любой точки  $M$  объект системы осуществляет некоторый процесс  $l$ , то для линии процесса  $l$  справедливо соотношение  $dw = \tilde{n}_l \cdot d\theta$ , где  $\tilde{n}_l$  – эмпирические величины, которые являются функциями процесса.

Выберем в области  $\Omega_n$  произвольную точку  $M$ . Будем считать, что вблизи данной точки осуществляется элементарный процесс, в результате которого состояние объекта изменяется от начального  $M$  до конечного состояния  $M'$ . Тогда элементарное изменение величины  $w$  можно представить в виде:

$$dw = \left( \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_{z_2 \dots z_n} \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial z_1} \right) dz_1 + \left( \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_{z_1, z_3 \dots z_n} \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial z_2} \right) dz_2 + \dots + \left( \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)_{z_1 \dots z_{n-1}} \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial z_n} \right) dz_n, \quad (2)$$

$$dw = \tilde{n}_1 \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial z_1} \right) dz_1 + \tilde{n}_2 \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial z_2} \right) dz_2 + \dots + c_n \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial z_n} \right) dz_n. \quad (3)$$

В связи с тем, что мы строим вероятностную среду моделирования, будем считать, что аналитическая функция  $\theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$  может быть представлена в виде геометрической вероятности  $\theta = (z_1 \cdot z_2 \cdot \dots \cdot z_n) / (z_{1, \max} \cdot z_{2, \max} \cdot \dots \cdot z_{n, \max})$  пространства состояний системы  $\Omega_n$ , где  $z_{k, \max}$  – максимально наблюдаемые значения величин  $z_k$ . Можно показать, что в данном случае для уравнения (3) существует интегрирующий делитель, который обращает данное уравнение в полный дифференциал. Покажем, что интегрирующим делителем уравнения (3) будет функция  $\theta$ , принятая в виде геометрической вероятности пространства  $\Omega_n$ . Подставив данную функцию в (3) и деля это уравнение на  $\theta$ , получим:

$$ds = \frac{dw}{\theta} = c_1 \cdot \frac{dz_1}{z_1} + c_2 \cdot \frac{dz_2}{z_2} dz_2 + \dots + c_n \cdot \frac{dz_n}{z_n} dz_n. \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (4), представим общий интеграл в виде:

$$s - s_0 = c_1 \cdot \ln \left( \frac{z_1}{z_{10}} \right) + c_2 \cdot \ln \left( \frac{z_2}{z_{20}} \right) + \dots + c_n \cdot \ln \left( \frac{z_n}{z_{n0}} \right), \quad (5)$$

где  $s_0, z_{10}, \dots, z_{n0}$  – параметры некоторого опорного состояния.

Определим общий интеграл  $s$  как *энтропию*, исходя из аналогий с термодинамикой. Энтропия является характеристической функцией пространства состояний системы. Как показано в источнике [4] в параметрическом представлении энтропия является длиной дуги векторной линии некоторого поля направлений, порождаемого скалярным полем статистической вероятности  $w$ . Этот вывод вытекает из вида уравнения Пфаффа (3) и его общих решений. Известно, что соответствующее поле направлений имеет вид:

$$\Gamma(z_1, z_2, \dots, z_n) = \frac{z_1}{n \cdot c_1} \cdot \mathbf{e}_1 + \frac{z_2}{n \cdot c_2} \cdot \mathbf{e}_2 + \dots + \frac{z_n}{n \cdot c_n} \cdot \mathbf{e}_n, \quad (6)$$

где  $\mathbf{e}_k$  – единичные векторы, направленные соответственно по осям координат  $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$  пространства состояний  $\Omega_n$ . Векторные линии данного поля будут определяться обыкновенными дифференциальными уравнениями:

$$n \cdot \tilde{n}_1 \frac{dz_1}{z_1} = n \cdot c_2 \frac{dz_2}{z_2} = \dots = n \cdot c_n \frac{dz_n}{z_n} = \frac{dw}{\theta} = ds, \quad (7)$$

откуда легко получить выражение (4) для изменения энтропии состояния.

Для вектора  $\Gamma$  существует семейство поверхностей, ортогональных к линиям энтропии  $s$ . Уравнение таких поверхностей определяется из скалярного произведения  $(\Gamma \mathbf{t}) = 0$ , где  $\mathbf{t} = \mathbf{e}_1 \cdot dz_1 + \mathbf{e}_2 \cdot dz_2 + \dots + \mathbf{e}_n \cdot dz_n$  – вектор, лежащий в касательной плоскости к исходной поверхности. Это уравнение в развернутом виде приводит к соотношению:

$$\frac{z_1}{c_1} dz_1 + \frac{z_2}{c_2} dz_2 + \dots + \frac{z_n}{c_n} dz_n = 0, \quad (8)$$

которое также является уравнением Пфаффа. Пфаффова форма, стоящая в левой части уравнения Пфаффа (8), при постоянных величинах  $c_k$  в окрестности точки  $M$  является полным дифференциалом, поэтому из уравнения (8) может быть определен потенциал  $U(z_1, z_2, \dots, z_n) = C$ , который представляет собой поверхность, ортогональную векторным линиям энтропии:

$$U(z_1, z_2, \dots, z_n) = \frac{1}{2} \left( \frac{z_1^2 - z_{10}^2}{c_1} dz_1 + \frac{z_2^2 - z_{20}^2}{c_2} dz_2 + \dots + \frac{z_n^2 - z_{n0}^2}{c_n} dz_n \right). \quad (9)$$

Энтропия  $s$  и потенциал  $U$  могут быть приняты в качестве обобщенных критериев для комплексной оценки состояния объектов в многомерном пространстве  $\Omega_n$ . Их наиболее важной особенностью является то, что данные величины являются функциями состояния системы при справедливости условия существования скалярного поля статистической вероятности  $w$ . Изменение данных функций зависит только от начального и конечного состояния объекта и не зависит от пути его перехода между этими состояниями.

Таким образом, феноменологический анализ данных основан на постулировании существования многомерного скалярного поля величины  $w$  и описании процессов через связь величин  $w$  и  $\theta$  вида  $dw = c_l \cdot d\theta$ . Величины  $c_l$  опреде-

ляются по таблично-временным массивам данных, характеризующим загрязнение атмосферного воздуха в группе всех наблюдаемых объектов.

Отсюда видно, что предлагаемый метод тесно связан с логикой построения теории термодинамики, так как изначально вводятся феноменологически определяемые величины  $c_l$ , характеризующие динамические процессы.

**Результаты анализа данных.** Для примера рассмотрим сложное совместное событие одновременного наблюдения четырех наиболее распространенных веществ, загрязняющих атмосферный воздух в городах: пыли, диоксида серы, оксида углерода и диоксида азота. Соответственно введем показатели загрязнения  $z_1, z_2, z_3, z_4$  в виде концентраций этих веществ в атмосферном воздухе. Определим, что уровень загрязнения воздуха будет определяться данным событием. Для того, чтобы разработать систему комплексной оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха необходимо иметь возможность определять положение каждого города при формировании экологических процессов в пространстве состояний  $\{z_1, z_2, z_3, z_4\}$ . Для этого воспользуемся принципом соответственных состояний. В физике и химии данный принцип является обобщением эмпирического положения, что для объектов одного класса многие свойства тесно связаны с некоторыми характерными (опорными) свойствами для всех объектов приблизительно одинаково. При реализации этого принципа в процессе построения моделей параметры состояний некоторых объектов выбираются в качестве опорных и все остальные свойства объектов соотносятся с этой точкой в изучаемом пространстве свойств. Введем в рассмотрение некоторый объект, показатели загрязнения воздуха для которого равны предельно допустимым концентрациям вредных веществ. Состояние данного объекта примем в качестве опорного, при этом зададим следующие концентрации: для пыли  $z_{10} = 0,15 \text{ мг/м}^3$ ; для диоксида серы  $z_{20} = 0,05 \text{ мг/м}^3$ ; для окси углерода  $z_{30} = 3,0 \text{ мг/м}^3$ ; для диоксида азота  $z_{40} = 0,04 \text{ мг/м}^3$ .

Для поиска нелинейных связей между статистической вероятностью состояния системы и показателями загрязнения воздуха воспользуемся методом пробит-анализа. Свяжем полученную вероятность  $w$  с распределениями переменных в массиве опытных данных, в результате чего будем иметь следующую регрессионную зависимость вероятности  $w$  от энтропии состояния системы:

$$\text{Pr ob} = -0,5045 + s; \quad w = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr ob}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt;$$

$$s = 0,4379 \cdot \ln\left(\frac{z_1}{z_{10}}\right) + 0,2832 \cdot \ln\left(\frac{z_2}{z_{20}}\right) + 0,3962 \cdot \ln\left(\frac{z_3}{z_{30}}\right) + 0,2963 \cdot \ln\left(\frac{z_4}{z_{40}}\right). \quad (10)$$

Коэффициент корреляции зависимости (10) составил 0,97, результаты обработки данных приведены на рисунке 1.



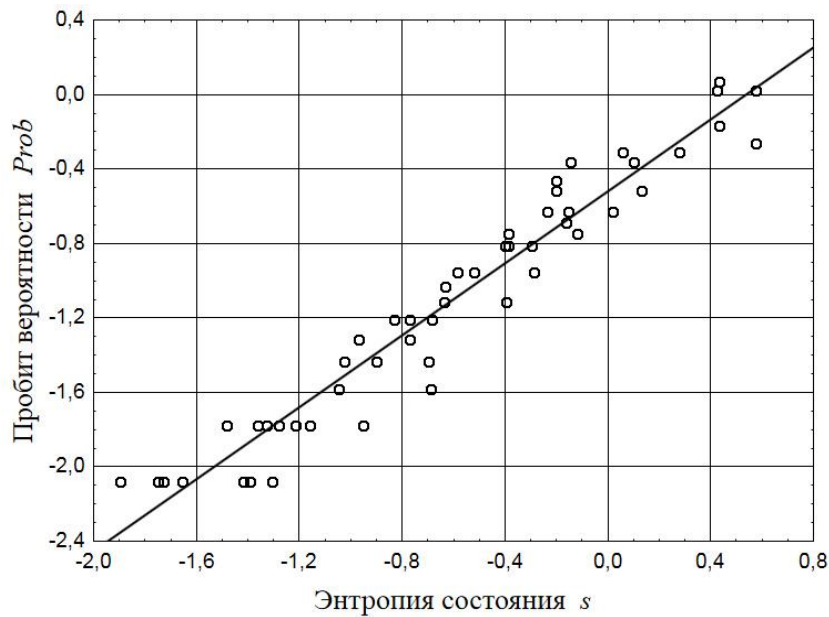


Рисунок 1 – Зависимость статистической вероятности  $w$  от энтропии состояния  $s$  для совместно наблюдаемых значений показателей загрязнения воздуха

Исходные переменные относились к значениям  $z_{10}, z_{20}, z_{30}, z_{40}$ , которые соответствуют выбранному опорному состоянию. Из приведенных данных видно, что феноменологические константы  $c_i$  соответственно равны:  $c_1 = 0,4379$ ,  $c_2 = 0,2832$ ,  $c_3 = 0,3962$ ,  $c_4 = 0,2963$ . Алгоритм подсчета вероятности состояния системы является однозначным, поэтому всегда существует функциональная зависимость вероятности  $w$  от исходных переменных, которая представляется в табличном виде. Как видно из рисунка 1, путем преобразования координат эту нелинейную функциональную зависимость можно представить с определенной степенью точности многомерной плоскостью. Такое приближение существенно упрощает процесс построения модели данных.

Согласно зависимостям (4) и (9) в пространстве наблюдаемых состояний системы  $\Omega_4$  можно построить криволинейные координаты, которые определяют некоторое поле направлений, отражающее среднестатистические тенденции, связанные с экологическими изменениями во всем изучаемом классе объектов.

Соответствующие функции состояния энтропия  $s$  и потенциал  $U$  определяют эти естественные криволинейные координаты в пространстве  $z_1, z_2, z_3, z_4$ , при этом точка  $M(z_1, z_2, z_3, z_4)$ , характеризующая окружающую среду каждого города в процессе своего экологического изменения, будет занимать некоторое положение относительно этих координат. Это позволяет объективно определить ранг объекта в иерархическом множестве других объектов. Потенциал является наиболее удобной величиной для определения ранга объекта.

На основе полученных данных, исходя из вероятностной оценки сложных совместных событий, связанных с одновременным наблюдением показателей загрязнения воздуха  $z_1, z_2, z_3, z_4$ , были определены энтропия и потенциал состояния для каждого города Украины. Результаты ранжирования объектов по данным наблюдений в 2008 и 2012 году приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения потенциала ( $U$ ) и рейтинги городов Украины, связанные с уровнем загрязнения атмосферы в 2008 – 2012 годах

Города Украины	Потенциал состояния $U$ (2008)	Потенциал состояния $U$ (2012)	Ранги городов по уровню загрязнения воздуха			
			согласно предложенного метода		согласно расчета КИЗА	
			2008	2012	2008	2012
Алчевск	17,83	11,56	6	12	6	11
Винница	-9,83	-7,46	47	46	47	45
Горловка	24,15	15,24	3	9	3	8
Дзержинск	26,15	22,47	2	4	2	4
Днепродзержинск	3,69	14,79	13	11	12	9
Днепропетровск	8,66	14,81	10	10	9	10
Донецк	42,30	37,66	1	2	1	1
Енакиево	20,90	15,32	5	8	4	7
Житомир	0,20	2,76	19	18	19	17
Запорожье	2,55	7,62	14	15	16	16
Ивано-Франковск	1,90	-6,26	15	41	14	40
Киев	-2,28	16,17	25	7	27	12
Кировоград	-5,58	-3,42	34	34	32	30
Красноперекоск	14,87	17,86	8	5	8	5
Кривой Рог	5,51	48,88	12	1	11	2
Лисичанск	-3,27	-3,64	26	36	24	33
Луганск	-10,51	-6,58	48	42	48	43
Львов	1,39	-1,50	16	28	15	23
Макеевка	24,05	36,15	4	3	5	3
Мариуполь	-4,57	-0,11	30	25	30	25
Николаев	-10,53	-7,37	49	45	49	47
Одесса	-0,46	2,88	21	17	18	14
Полтава	-7,11	-3,53	42	35	38	34
Ровно	-6,74	-9,10	39	49	41	49
Рубежное	-0,81	0,70	22	21	20	21
Северодонецк	-3,27	-2,11	26	31	24	26
Суммы	-1,79	-0,84	23	27	21	22
Тернополь	-6,47	-4,46	38	38	37	38
Ужгород	-4,80	-5,56	31	39	31	41
Харьков	-8,72	-7,80	45	47	44	46
Херсон	10,50	2,60	9	20	10	28
Хмельницкий	17,72	9,00	7	13	7	13
Черкассы	-7,23	-7,20	43	44	39	44
Черновцы	-11,84	-9,36	52	50	53	52
Чернигов	0,54	-0,05	18	24	26	31

Из приведенных данных видно, что к первым пяти городам, имеющим в 2012 самый высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха году по пыли, диоксидам серы и азота, а также оксиду углерода относятся: Кривой Рог, До-

нецк, Макеевка, Дзержинск и Красноперекоск.

Для примера, если взять те же вредные вещества и провести расчет комплексного индекса загрязнения атмосферы (КИЗА) по данным наблюдений за 2012 год, то самый высокий уровень загрязнения воздуха будет в городах: Донецк, Кривой Рог, Макеевка, Дзержинск и Красноперекоск.

Уровень загрязнения атмосферного воздуха городов Украины, определенный по методике расчета комплексного индекса загрязнения атмосферы [2], очень тесно связан с потенциалом состояния ( $U$ ), рассчитанным по данному методу. Результаты сравнения даны на рисунке 2.

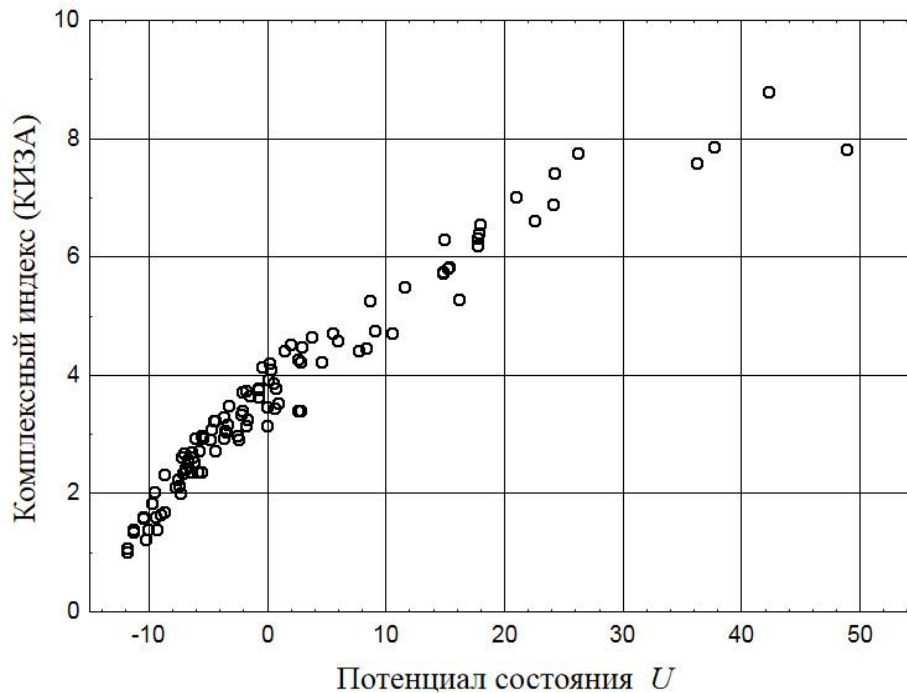


Рисунок 2 – Сравнение уровней загрязнения атмосферного воздуха городов Украины по различным методам оценки

**Выводы.** Полученные результаты позволяют предложить новый метод комплексной оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха. В целом суть метода основывается на гипотезе, связанной с возможностью создания феноменологических моделей процессов, отличающихся многомерным полевым представлением массивов количественной информации о загрязнении воздуха, а также существованием скалярного поля статистической вероятности характерных совместных событий, комплексно отражающих уровень загрязнения воздушной среды. Особенностью данного метода является использование объективного алгоритмического подхода и отсутствие применения экспертных методов и зависимостей для комплексной оценки.

При наличии необходимого количества данных наблюдений предложенный метод может быть использован для комплексной оценки загрязнения как атмосферного воздуха, так и поверхностных и подземных вод, а также почв.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Какарека, С.В. Методические подходы к оценке суммарного загрязнения атмосферного воздуха. // Природопользование: Сб. научн. тр. СтройМедиаПроект, Институт природопользования НАН Беларуси. – Минск, 2014. – Вып. 25. – С. 61 – 69. – Режим доступа: [http://ecology.basnet.by/journal/priroda25/PRIRODA\\_25\\_1.pdf](http://ecology.basnet.by/journal/priroda25/PRIRODA_25_1.pdf) (24.04.15).
2. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. М.: Гос. ком. СССР по гидрометеорологии – Мин. здравоохранения СССР. 1991. – 691 с.
3. Звягинцева, А.В. Оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха промышленных городов Украины // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 109. – С. 233 – 243.
4. Аверин, Г.В. Системодинамика. Донецк: Донбасс, 2014. – 405 с. – Режим доступа: <http://www.chronos.msu.ru/ru/rnews/item/sistemodinamika> (20.12.2014).
5. Аверин, Г.В. Применение методов интеллектуального анализа данных при оценке развития Украины / Г.В. Аверин, А.В. Звягинцева // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 112. – С. 257 – 270.

## REFERENCES

1. Kakareka S.V. (2014), “Methodological approaches to the assessment of total pollution of atmospheric air”, *Sbornik nauchnykh trudov Prirodopolzovanie*, issue 25. StroyMediaProekt, Institut prirodopolzovaniya NAN Belarusi, Minsk, pp. 61 – 69, available at: [http://ecology.basnet.by/journal/priroda25/PRIRODA\\_25\\_1.pdf](http://ecology.basnet.by/journal/priroda25/PRIRODA_25_1.pdf) (Accessed 24 January 2015).
2. RD 52.04.186-89 (1991), *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosferyi* [Manual on control of air pollution]. Gos. kom. SSSR po gidrometeorologii – Min. zdavoohraneniya SSSR, Moscow. 1991. – 691 p.
3. Zviagintseva A.V. (2013), “Hazard assessment of air pollution of industrial cities of Ukraine”, *Sbornik nauchnykh trudov Geotekhnicheskaya mehanika*, issue 109. – pp. 233 – 243.
4. Averin G.V. (2014), *Sistemodinamika* [Systemdynamics], Donbass, Donetsk, Ukraine. – 405 p., available at: <http://www.chronos.msu.ru/ru/rnews/item/sistemodinamika> (Accessed 20 December 2014).
5. Averin G.V. and Zvyagintseva A.V. (2013), “Primenenie metodov intellektualnogo analiza dannykh pri otsenke razvitiya Ukrainyi”, *Sbornik nauchnykh trudov Geotekhnicheskaya mehanika*, issue 112. – pp. 257 – 269.

## Об авторах

**Звягинцева Анна Викторовна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем мониторинга Государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет» (ГВУЗ «ДонНТУ»), Украина, [anna\\_zv@ukr.net](mailto:anna_zv@ukr.net)

**Аверин Геннадий Викторович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры компьютерных систем мониторинга Государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет» (ГВУЗ «ДонНТУ»), Украина, [averin.gennadiy@gmail.com](mailto:averin.gennadiy@gmail.com)

## About the authors

**Zviagintseva Anna Victorovna**, PhD, associate professor with the department of computer systems for monitoring of Donetsk National Technical University, Ukraine, [anna\\_zv@ukr.net](mailto:anna_zv@ukr.net)

**Averin Gennadiy Viktorovich**, Dr.Sc., professor, head of the computer systems for monitoring department of Donetsk National Technical University, Ukraine, [averin.gennadiy@gmail.com](mailto:averin.gennadiy@gmail.com)

**Анотація.** Запропоновано метод комплексної оцінки забруднення атмосфери, заснований на алгоритмічному визначенні статистичних ймовірностей складних подій, які характеризують забруднення навколишнього середовища. Основна гіпотеза дослідження пов'язана з можливістю створення феноменологічних моделей процесів, які відрізняються багатовимірним польовим представленням масивів дослідних даних, а також існуванням скалярного поля статистичної ймовірності спільних подій, що відображають рівень забруднення повітря. Особливістю запропонованого методу є використання об'єктивного підходу та відсутність застосування експертних залежностей для оцінки. Надано приклад комплексної оцінки забруднення міст України на основі даних спостережень Українського гідрометеоцентру за 2003 – 2012 роки. Виконана оцінка рангів міст України за рівнем забруднення атмосфери.

**Ключові слова:** комплексна оцінка, забруднення середовища, несприятливі події, статистичні ймовірності

**Abstract.** The paper describes a method for air pollution complex assessment basing on algorithmic estimation of statistical probabilities of complex events which characterize the environment pollution. A key hypothesis of the study is based on a possibility of creating the process phenomenological models which differ by multidimensional field representation of experimental data and by existence of a scalar field of statistical probability of joint events occurrence which reflect an air pollution rate. The proposed method, in contrast to the conventional methods, uses an objective approach with no expert dependencies for the assessment. As an example, the paper presents a complex assessment of urban pollution in Ukraine on the basis of observations of Hydrometeorological Center of Ukraine during the period from 2003 to 2012. The cities were ranked according to rates of their air pollution.

**Keywords:** complex assessment, pollution, adverse events, statistical probabilities

*Статья поступила в редакцию 02.09.2015*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Т.В. Бунько*