



УДК 504.3.054: 004.94

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДОВ РОССИИ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ СОБЫТИЙ

### RUSSIAN CITIES AIR POLLUTION SIMULATION ON THE BASIS OF DETERMINING THE ADVERSE EVENTS PROBABILITY

**А.В. Звягинцева**  
**A.V. Zviagintseva**

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85*

*Belgorod State National Research University,  
85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia*

*E-mail: zviagintseva@bsu.edu.ru*

*Аннотация.* Предложен метод комплексной оценки загрязнения атмосферного воздуха, основанный на феноменологическом описании состояния изучаемых объектов и алгоритмическом определении статистических вероятностей сложных событий, связанных с загрязнением воздуха. На примере оценки уровня загрязнения воздуха городов России показана возможность получения феноменологических моделей на основе данных натурных наблюдений. Ранжирование крупных городов России выполнено путем определения вероятностей совместных событий, связанных с одновременным наблюдением в атмосфере концентраций нескольких загрязняющих веществ. Метод позволяет оценить уровень риска загрязнения воздуха в многомерном пространстве показателей по отношению к объекту, у которого наблюдается безопасный уровень загрязнения воздуха, регламентируемый действующими санитарно-гигиеническими нормами. Разработанные модели отличаются универсальностью представления данных и могут быть ориентированы на описание массивов количественной информации, которую собирают субъекты экологического мониторинга. Предложенный подход позволяет усовершенствовать методики комплексной оценки уровня загрязнения природных сред.

*Resume.* The air pollution integrated assessment method, based on the phenomenological description of the objects state study and statistical probabilities algorithmic definition of complex events associated with air pollution. For example, air pollution assessment level in Russian cities shown the possibility of obtaining phenomenological models based on field data. Large Russian cities ranking carried out by determining the related joint events probability to the several pollutants atmospheric concentrations simultaneous observation. The method allows to evaluate the air pollution level risk in the multidimensional parameters space in relation to the object, which is observed safe air pollution level, regulated by current health and hygiene standards. The developed models are universal data and can be focused on the quantitative information arrays description which is collected environmental monitoring subjects. The proposed approach makes it possible to improve the complex evaluation methodology of the natural environments contamination level.

*Ключевые слова:* методы моделирования, комплексная оценка, состояние атмосферного воздуха, алгоритмическое определение вероятностей неблагоприятных (опасных) событий, массивы данных наблюдений.

*Keywords:* modeling methods, integrated assessment, air condition, adverse (hazardous) events probability algorithmic definition, observational datasets.

## Введение

Сегодня комплексная оценка загрязнения атмосферного воздуха осуществляется на основе данных наблюдений с использованием различных подходов, в основу которых зачастую положены экспертные методы. Недостатком таких методов является субъективный подход исследователей к формированию расчетных методов и зависимостей [Методуказания, 1995; Алимов, 1999; Яйли, 2006].

Анализ множества работ в области изучения качества атмосферного воздуха показывает, что, несмотря на особую актуальность данного направления исследований, задача разработки вероятностных методов оценки опасности, связанной с загрязнением воздуха, исследователями недостаточно проработана. Алгоритмическое определение вероятностей совместных



неблагоприятных событий с использованием уже накопленных массивов данных наблюдений, характеризующих загрязнение окружающей среды, позволяет поставить и решить задачу комплексной оценки опасности.

Целью данной статьи является разработка нового метода комплексной оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха на основе математических моделей определения вероятностей неблагоприятных совместных событий, связанных с превышением фактическими концентрациями вредных веществ допустимых норм. Данный метод относится к объективным средствам анализа данных, так как не использует экспертные подходы, а основан на оценках вероятности состояний сложных природно-антропогенных систем.

### Описание данных и математическая модель

Информационная основа метода состоит в использовании данных наблюдений о загрязнении воздуха в городах, представленных в виде таблично-временных массивов информации за 5–10 лет. Таблицы данных включают города как объекты наблюдений и показатели загрязнения атмосферного воздуха в виде концентраций вредных веществ. Состояние загрязнения атмосферы городов изменяется с течением времени, то есть осуществляется некоторый динамический процесс. Разные таблицы данных соответствуют различному периоду наблюдений (за месяц, год и т.д.). Данный метод позволяет определить состояние каждого объекта (города, района, территории) совокупностью одновременно наблюдаемых показателей загрязнения воздуха в заданный момент времени.

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

Существует, по крайней мере, несколько возможных алгоритмов, позволяющих определить вероятности состояний в многомерном пространстве. Например, первый алгоритм предполагает выделение многомерных параллелепипедов с вершинами, образованными опытными точками, и последующий подсчет числа точек, попавших в эти параллелепипеды. Для примера на рисунке 1 число благоприятных случаев характеризуется количеством точек, попавших в выделенную на рисунке область, а общее число данных характеризуется количеством всех наблюдаемых точек. Это позволяет определить относительные частоты наблюдаемых событий.

Второй более строгий алгоритм позволяет разбить всю наблюдаемую область  $H_n$  на многомерные параллелепипеды, исходя из заданного количества (обычно одинакового для всех  $p_i$ ) интервалов группирования для каждой переменной  $p_i$ . После этого подсчитываются относительные частоты событий, равные отношению количества опытных точек, которые попадают в заданные многомерные параллелепипеды, к общему числу всех наблюдаемых точек. Статистическая вероятность принимается в виде кумулятивных относительных частот изучаемых совместных событий, например, при совместном наблюдении нескольких показателей. По данным относительных частот могут быть построены многомерные гистограммы, характеризующие распределения вероятностей совместных событий, например, как показано на рисунке 2.

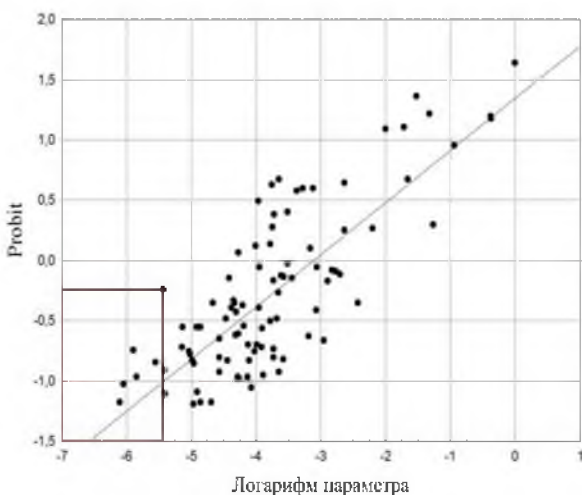


Рис. 1. Определение относительных частот совместных событий непосредственным подсчетом  
Fig. 1. The joint events relative frequency determination by direct calculation

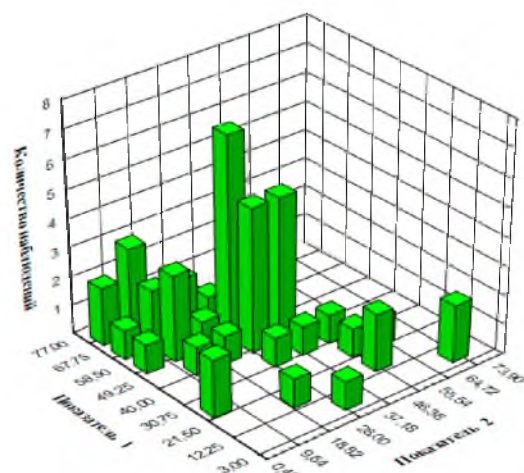


Рис. 2. Гистограмма частот наблюдения совместных событий  
Fig. 2. The joint monitoring events frequency histogram related



Соответствующие скрипты определения вероятностей событий для первого и второго случаев разработаны применительно к использованию в программном продукте Statistica. В работах [Аверин, Звягинцева, 2013; Аверин, 2014] также даны алгоритмы непосредственного подсчета относительных частот совместных событий для многомерных случаев.

Для решения поставленных задач методикой исследований предусматривалось использование феноменологических методов описания данных применительно к совокупности наблюдений Росгидромета о загрязнении воздуха вредными веществами. Опасность загрязнения оценивалась путем сравнения уровня загрязнения воздуха с действующими санитарно-гигиеническими нормами.

В России в настоящее время контроль за состоянием качества атмосферного воздуха проводится в 260 городах на 710 станциях; регулярные наблюдения Росгидромета проводятся в 226 городах на 649 станциях. Обычно в базе данных представлена информация о концентрациях следующих основных загрязняющих веществ: пыль, диоксид азота, диоксид серы, оксид углерода, формальдегид, тяжелые металлы и бенз(а)пирен. Для отдельных городов также имеется информация о концентрациях фенола, аммиака, фтористого водорода, сероводорода, хлористого водорода, сажи, растворенных сульфатов, бензола и т.д. В настоящее время в базу данных загрязнения городов России заносится содержание более 30 вредных примесей в атмосферном воздухе. В работе использованы данные наблюдений уровня загрязнения воздуха в наиболее крупных городах России (35 городов), которые имеются в открытом доступе [Качество воздуха, 2009; Ежегодник состояния, 2014].

Собранные данные представляются в виде многомерных массивов количественной информации. Анализ этой информации осуществляется путем сортировки данных, что позволяет определить все неблагоприятные события. В процессе анализа 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.

Теоретические положения метода заключаются в следующем [Звягинцева А.В., 2013; Zviagintseva A.V., 2014; Averin G.V et al., 2015; Звягинцева А.В., 2016]. Предположим, что в таблично-временных массивах данных содержится количественная информация о концентрациях в атмосферном воздухе  $n$  загрязняющих веществ  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Зададим  $n$ -мерное пространство  $H_n \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , тогда состояние любого объекта (города) в  $n$ -мерном пространстве в каждый момент времени будет отображаться многомерной точкой  $M = M(p_1, p_2, \dots, p_n)$ , процесс изменения состояния объекта во времени – многомерной кривой, которая описывается точкой  $M$  в этом пространстве. Каждой опытной точке  $M_i$  поставим 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 концентраций веществ  $(p_{1i}, p_{2i}, \dots, p_{ni})$ , отображающихся точкой  $M_i$ , но и данным наблюдаемым событием. Назовем статистическую вероятность этого события вероятностью состояния изучаемой системы, которая включает все наблюдаемые объекты и характеризует процессы загрязнения атмосферного воздуха в городах. Неблагоприятным событием  $A_i$  будем считать событие, для которого хотя бы одна наблюдаемая концентрация  $p_1, p_2, \dots, p_n$  превышает установленные нормы, например, предельно допустимую концентрацию загрязняющего вещества в атмосферном воздухе.

Для создания модели данных предположим непрерывность области  $H_n$ . Это означает, что в пространстве состояний  $H_n$  существует бесконечное множество состояний для некоторой генеральной совокупности однотипных объектов и точки состояний  $M(p_1, p_2, \dots, p_n)$  этих объектов непрерывно заполняют это пространство. Считаем также, что опытные точки из базы данных являются ограниченной выборкой наблюдений из данной генеральной совокупности. Для построения моделей количественных данных принимаем гипотезу о непрерывности поля вероятности состояния в области  $H_n$ . Для этого считаем, что вероятность состояния системы образует скалярное поле, которое является непрерывным в области  $H_n$ . Для построения модели описания процессов считаем, что скалярное поле величины  $w$  может быть аналитически описано в окрестности произвольной точки  $M$ . Предположим, что в области  $H_n$  можно задать аналитическую непрерывную функцию  $T(p_1, p_2, \dots, p_n)$ , на основе которой будет формироваться математическая модель для комплексной оценки состояний объектов. Примем также, что скалярные поля величин  $w$  и  $T$  однозначно связаны между собой. Если в окрестности любой



точки  $M$  объект осуществляет некоторый процесс  $l$ , то для линии процесса  $l$  справедливо соотношение  $dw = c_l \cdot dT$ , где  $c_l$  – феноменологические величины, которые являются функциями процесса и подлежат определению по опытным данным. При справедливости принятых выше гипотез феноменологические описания опытных данных, представленных таблично-временными массивами информации, тесно связаны с уравнениями Пфаффа [Эльсгольц, 1969].

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

$$dw = \left( \frac{\partial w}{\partial T} \right)_{p_1, \dots, p_n} \left( \frac{\partial T}{\partial p_1} \right) dp_1 + \left( \frac{\partial w}{\partial T} \right)_{p_1, p_2, \dots, p_n} \left( \frac{\partial T}{\partial p_2} \right) dp_2 + \dots + \left( \frac{\partial w}{\partial T} \right)_{p_1, \dots, p_{n-1}} \left( \frac{\partial T}{\partial p_n} \right) dp_n; \quad (1)$$

$$dw = c_1 \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial p_1} \right) dp_1 + c_2 \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial p_2} \right) dp_2 + \dots + c_n \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial p_n} \right) dp_n, \quad (2)$$

где  $c_k$  – феноменологические величины, характеризующие процессы изменения состояний объектов при изменении показателей  $p_k$ , которые в самом общем случае зависят от переменных  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , однако в окрестности точки  $M$  их можно считать постоянными величинами.

Введение функции  $T(p_1, p_2, \dots, p_n)$  необходимо для построения комплексных моделей описания опытных данных в математическом виде. Уравнение Пфаффа (2) при постоянных величинах  $c_k$  зависит от вида функции  $T$  и распределения вероятности  $w$ .

В связи с тем, что мы строим вероятностную среду моделирования, считаем, что аналитическая функция  $T(p_1, p_2, \dots, p_n)$  может быть представлена в виде геометрической вероятности пространства состояний системы  $H_n$ :

$$T = \frac{P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n}{P_{1,0} \cdot P_{2,0} \cdot \dots \cdot P_{n,0}}, \quad (3)$$

где  $P_{1,0}, P_{2,0}, \dots, P_{n,0}$  – максимально наблюдаемые или опорные значения параметров. Величину  $T$  назовем комплексным индексом состояния системы.

Подставляя (3) в уравнение (2) и деля полученное уравнение на эту величину  $T$  получим:

$$ds = \frac{dw}{T} = c_1 \cdot \frac{dp_1}{p_1} + c_2 \cdot \frac{dp_2}{p_2} + \dots + c_n \cdot \frac{dp_n}{p_n}; \quad (4)$$

$$s - s_0 = c_1 \cdot \ln \left( \frac{p_1}{p_{10}} \right) + c_2 \cdot \ln \left( \frac{p_2}{p_{20}} \right) + \dots + c_n \cdot \ln \left( \frac{p_n}{p_{n0}} \right). \quad (5)$$

Данную функцию состояния обычно называют энтропией. Из полученных результатов следует, что для уравнения Пфаффа (2) в пространстве  $H_n$  существует некоторое поле направлений, порождаемое скалярным полем статистической вероятности  $w$  и которое связано с линиями энтропии  $s$ .

В соответствии с [Эльсгольц, 1969] и как показано в работах [Аверин, Звягинцева, 2013; Аверин, 2014], семейство поверхностей, ортогональных линиям энтропии, определяется из скалярного произведения вектора:

$$\vec{W} = \frac{P_1}{c_1} \mathbf{e}_1 + \frac{P_2}{c_2} \mathbf{e}_2 + \dots + \frac{P_n}{c_n} \mathbf{e}_n \quad (6)$$

и единичного вектора  $\mathbf{e} = \mathbf{e}_1 \cdot dp_1 + \mathbf{e}_2 \cdot dp_2 + \dots + \mathbf{e}_n \cdot dp_n$ , а именно  $(\vec{W} \cdot \mathbf{e}) = 0$ .

Последнее соотношение можно представить в развернутом виде многомерного уравнения Пфаффа:

$$\frac{P_1}{c_1} \cdot dp_1 + \frac{P_2}{c_2} dp_2 + \dots + \frac{P_n}{c_n} dp_n = 0, \quad (7)$$

из которого можно найти общий интеграл в виде потенциала  $P(p_1, p_2, \dots, p_n) = C$ . Интегрируя данное уравнение, получим:

$$P(p_1, p_2, \dots, p_n) = \frac{1}{2} \left( \frac{p_1^2 - p_{10}^2}{c_1} + \frac{p_2^2 - p_{20}^2}{c_2} + \dots + \frac{p_n^2 - p_{n0}^2}{c_n} \right), \quad (8)$$

где принято, что потенциал для опорного состояния  $P(p_{10}, p_{20}, \dots, p_{n0}) = 0$ .



Таким образом, в пространстве  $H_n$  можно ввести обобщенные координаты в виде энтропии и потенциала, которые позволят в новом преобразованном пространстве координат линеаризовать нелинейное скалярное поле вероятности состояния системы.

Энтропию  $s$  и потенциал  $P$  примем в качестве обобщенных критериев для комплексной оценки состояния объектов в многомерном пространстве  $H_n$ , так как они являются функциями состояния системы при справедливости условия существования скалярного поля вероятности  $w$ . Их наиболее важной особенностью является то, что данные величины являются функциями состояния, а также то, что энтропия и потенциал отличаются свойством аддитивности. Изменение данных функций зависит только от начального и конечного состояния объекта и не зависит от пути его перехода между этими состояниями.

Данные функции состояния определяют естественные криволинейные координаты в преобразованном пространстве, при этом каждый объект в процессе своего изменения и развития будет занимать некоторое положение относительно этих координат.

### 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  $p_1, p_2, p_3, p_4$  в виде концентраций этих веществ в атмосферном воздухе. Определим, что уровень загрязнения воздуха будет определяться событием совместного наблюдения концентраций этих веществ. Для того, чтобы разработать систему комплексной оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха необходимо иметь возможность определять положение каждого города в пространстве состояний  $H_4\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$  относительно некоторого опорного состояния. 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  $p_{10} = 0,15$  мг/м<sup>3</sup>; для диоксида серы  $p_{20} = 0,05$  мг/м<sup>3</sup>; для оксида углерода  $p_{30} = 3,0$  мг/м<sup>3</sup>; для диоксида азота  $p_{40} = 0,04$  мг/м<sup>3</sup>. В связи с тем, что в городах события, связанные с загрязнением атмосферного воздуха различными вредными веществами, обычно зависимы, вероятности таких совместных событий (статистические вероятности состояния  $w$ ) будем определять алгоритмическим путем.

Для поиска нелинейных связей между статистической вероятностью состояния системы и показателями загрязнения воздуха воспользуемся методом пробит-анализа. Для городов России 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:

$$Prob = -0,2501 + s ; w = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{Prob} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt ;$$

$$s = 0,3001 \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_{10}}\right) + 0,2038 \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_{20}}\right) + 0,3358 \cdot \ln\left(\frac{P_3}{P_{30}}\right) + 0,6206 \cdot \ln\left(\frac{P_4}{P_{40}}\right). \quad (9)$$

Коэффициент корреляции зависимости (9) составил 0.89, результаты обработки данных приведены на рисунке 3.

Исходные переменные относились к значениям  $p_{10}, p_{20}, p_{30}, p_{40}$ , которые соответствуют выбранному опорному состоянию. Из приведенных данных видно, что феноменологические константы  $c_i$  соответственно равны:  $c_1 = 0.3001$ ,  $c_2 = 0.2038$ ,  $c_3 = 0,3358$ ,  $c_4 = 0.6206$ . 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 3, 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 (5) и (9) в пространстве наблюдаемых состояний системы  $H_4$  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  $P$  определяют эти естественные криволинейные координаты в пространстве  $H_4$ , при этом точка  $M(p_1, p_2, p_3, p_4)$ , характеризующая окружающую среду каждого города в процессе своего



экологического изменения, будет занимать некоторое положение относительно этих координат. Это позволяет объективно определить ранг объекта во множестве других объектов. Потенциал является удобной величиной для определения ранга объекта.

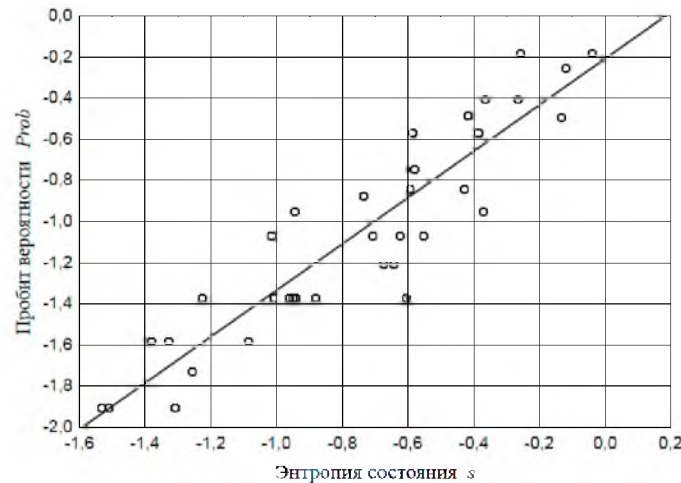


Рис. 3. Зависимость вероятности  $w$  от энтропии состояния  $s$  для совместно наблюдаемых значений показателей загрязнения атмосферного воздуха (города России)  
Fig. 3. The entropy state probability dependence to jointly observed air pollution indicators values (Russian cities)

На основе полученных данных, исходя из вероятностной оценки сложных совместных событий, связанных с одновременным наблюдением показателей загрязнения воздуха  $p_1, p_2, p_3, p_4$ , были определены энтропия и потенциал состояния для каждого города России. Результаты ранжирования объектов по данным наблюдений в 2007 году приведены в таблице.

В данной таблице приведено также сравнение результатов комплексной оценки уровня загрязнения воздуха по предложенному методу с результатами расчета комплексного индекса загрязнения воздуха *КИЗА*, который используется субъектами мониторинга. Применение данного индекса регламентируется нормативным документом [РД 52.04.186-89, 1991]. Комплексный индекс загрязнения атмосферы определяется на основе экспертной зависимости вида:

$$КИЗА = \sum_{i=1}^n \left( \frac{C_i}{ПДК_{c.ci}} \right)^{\beta_i}, \quad (10)$$

где  $n$  – число загрязняющих атмосферу веществ, учитываемых при определении индекса,  $C_i$  – среднегодовая концентрация  $i$ -ой примеси в воздухе;  $\beta_i$  – экспертный показатель вредности  $i$ -ой примеси, зависящий от класса опасности вещества (для веществ 1-го класса опасности равен 1.7; для веществ 2-го – 1.3; третьего – 1.0; четвертого – 0.9).

В настоящее время в постсоветских странах соответствующий индекс широко используется гидрометеослужбами для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах [РД 52.04.186-89, 1991; Какарека, 2014]. Данный индекс, 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 ( $КИЗА \leq 5$ ), класс риска ( $5 < КИЗА \leq 8$ ), класс кризиса ( $8 < КИЗА \leq 15$ ) и класс бедствия ( $КИЗА > 15$ ). Таким образом, показатель *КИЗА* дает экспертную оценку уровня опасности загрязнения воздуха, сущностью которого является оценка уровня загрязнения по отношению к среднестатистическим показателям в изучаемой группе объектов. В свою очередь, предложенный метод позволяет оценить уровень риска загрязнения воздуха в многомерном пространстве показателей по отношению к объекту, у которого наблюдается безопасный уровень загрязнения атмосферного воздуха, регламентируемый действующими нормами.

Из приведенных в таблице данных видно, что к первым пяти крупнейшим городам России, имевшим в 2007 году самый высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха по пыли, диоксидам серы и азота, а также оксиду углерода относятся: Воронеж, Хабаровск, Иркутск, Новосибирск и Тюмень. В свою очередь, согласно расчетов *КИЗА* самый высокий уровень загрязнения воздуха наблюдался в городах: Воронеж, Хабаровск, Казань, Владивосток и Москва. Уровень загрязнения атмосферного воздуха городов России, определенный по методике расчета комплексного индекса загрязнения атмосферы [РД 52.04.186-89, 1991], тесно связан с потенциалом состояния ( $P$ ), рассчитанным по данному методу.



Таблица  
Table

**Значения энтропии ( $s$ ), потенциала ( $P$ ) и рейтинги  
крупнейших городов России, связанные с уровнем загрязнения атмосферы  
Entropy values ( $s$ ), capacities ( $P$ ) and ratings for the largest Russian cities related to air pollution  
level**

Крупнейшие города России	Энтропия состояния $s$	Потенциал состояния $P$	Ранги городов по уровню загрязнения воздуха	
			согласно предложенного метода	Согласно расчета <i>КИЗА</i>
Астрахань	-1.23	-9.69	29	28
Барнаул	-0.58	-3.61	9	11
Владивосток	-0.26	-3.76	11	4
Волгоград	-0.55	-6.65	20	18
Воронеж	0.14	14.05	1	1
Екатеринбург	-0.43	-5.84	17	13
Ижевск	-1.51	-10.32	33	33
Иркутск	-0.27	-1.75	3	7
Казань	-0.61	-3.72	10	3
Кемерово	-1.09	-8.94	25	24
Киров	-1.38	-10.21	32	32
Краснодар	-0.96	-3.60	8	19
Красноярск	-0.59	-4.84	14	14
Липецк	-1.31	-9.00	26	30
Москва	-0.12	-4.27	12	5
Нижегород	-0.95	-7.13	21	20
Новокузнецк	-0.94	-2.83	6	16
Новосибирск	-0.37	-2.52	4	8
Омск	-1.53	-9.82	31	31
Оренбург	-0.59	-5.74	16	17
Пенза	-1.01	-9.78	30	27
Пермь	-1.33	-9.34	27	29
Ростов-на-Дону	-0.42	-3.50	7	12
Рязань	-1.02	-8.54	24	25
Самара	-0.88	-9.56	28	26
Санкт-Петербург	-0.63	-4.39	13	10
Саратов	-0.65	-6.26	18	15
Тольятти	-0.95	-7.82	22	23
Тула	-2.19	-12.09	35	35
Тюмень	-0.39	-2.79	5	6
Ульяновск	-0.37	-4.87	15	9
Уфа	-0.71	-6.27	19	21
Хабаровск	-0.04	0.67	2	2
Челябинск	-0.68	-7.83	23	22
Ярославль	-2.07	-11.24	34	34

**Заключение**

Полученные результаты позволяют предложить метод комплексной оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха на основе использования распределений вероятностей совместных событий. Особенностью данного метода является использование алгоритмического подхода и отсутствие применения экспертных методов и зависимостей для комплексной оценки. При наличии необходимого количества данных наблюдений о загрязнении природных сред в городах и населенных пунктах предложенный метод может быть использован для комплексной оценки загрязнения как атмосферного воздуха, так и поверхностных и подземных вод, а также почв.

**Список литературы  
References**

Аверин Г.В. 2014. Системодинамика. Донецк, Донбасс, 405  
Averin G.V. 2014. Sistemodinamika [Systemdynamics]. Doneck, Donbass, 405. (in Russian).





Аверин Г.В., Звягинцева А.В. 2013. Применение методов интеллектуального анализа данных при оценке развития Украины. Геотехническая механика, 112: 257–270.

Averin G.V., Zvjaginцева A.V. 2013. Primenenie metodov intellektual'nogo analiza dannyh pri ocenke razvitiya Ukrainy [The use of data mining techniques in the evaluation of the development of Ukraine]. Geotekhnicheskaja mehanika, 112: 257–270.

Алимов А.Ф., Дмитриев В.В., Флоринская Т.М. и др. 1999. Интегральная оценка экологического состояния и качества среды городских территорий. СПб., 253.

Alimov A.F., Dmitriev V.V., Florinskaja T.M. i dr. 1999. Integral'naja ocenka jekologicheskogo sostojanija i kachestva sredy gorodskih territorij [The environmental condition integral assessment and environment quality in urban areas]. SPb., 253.

Временные методические указания по проведению комплексной экологической оценки состояния атмосферного воздуха большого города. Дата введения 25.12.1995, М., Минприроды России, НИИ Атмосфера. URL: <http://www.bestpravo.ru/rossijskoje/jl-normy/w8v.htm> (6 февраля 2016).

Vremennye metodicheskie ukazaniya po provedeniju kompleksnoj jekologicheskoy ocenki sostojanija atmosfernogo vozduha bol'shogo goroda [Interim guidelines for the atmospheric air integrated environmental assessment in a big city]. Data vvedeniya 25.12.1995, M., Minprirody Rossii, NII Atmosfera. Available at: <http://www.bestpravo.ru/rossijskoje/jl-normy/w8v.htm> (accessed 6 February 2016). (in Russian).

Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2013 г. 2014. СПб., ООО РИФ «Д'Арт», 231.

Ezhegodnik sostojanija zagrjaznenija atmosfery v gorodah na territorii Rossii za 2013 g. 2014 [Air pollution state Yearbook in the Russian cities in 2013.]. SPb., ООО RIF "D'Art", 231.

Звягинцева А.В. 2013. Комплексная оценка природно-антропогенных систем: предложения по развитию методологии. Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, № 1(4)–2(5): 62–74.

Zvjaginцева A.V. 2013. Kompleksnaja ocenka prirodno-antropogennyh sistem: predlozheniya po razvitiju metodologii. Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve [Comprehensive assessment of natural and human systems: proposals for the development methodology], № 1(4)–2(5): 62–74.

Звягинцева А.В. 2016. О вероятностном анализе данных наблюдений о состоянии природно-антропогенных систем в многомерных пространствах. Научные ведомости БелГУ, серия Экономика. Информатика, 37(223): 93–100.

Zvjaginцева A.V. 2016. O verojatnostnom analize dannyh nabljudenij o sostojanii prirodno-antropogennyh sistem v mnogomernyh prostranstvah [About probabilistic analysis of observational data about the natural and anthropogenic systems state in multidimensional spaces]. Nauchnye vedomosti BelGU, serija Jekonomika. Informatika, 37(223): 93–100.

Какарека С.В. 2014. Методические подходы к оценке суммарного загрязнения атмосферного воздуха. В сб. научн. тр.: Природопользование. Минск, СтройМедиаПроект, институт природопользования, 25: 61–69. URL: [http://ecology.basnet.by/journal/priroda25/PRIRODA\\_25\\_1.pdf](http://ecology.basnet.by/journal/priroda25/PRIRODA_25_1.pdf) (3 февраля 2016).

Kakareka S.V. 2014. Metodicheskie podhody k ocenke summarnogo zagrjaznenija atmosfernogo vozduha [Methodical approaches to the estimation of the total air pollution]. V sb. nauchn. tr.: Prirodopol'zovanie. Minsk, StrojMediaProekt, institut prirodopol'zovanija, 25: 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 6 February 2016). (in Russian).

Качество воздуха в крупнейших городах России за 10 лет 1998–2007 гг. Аналитический обзор. 2009. СПб., 134.

Kachestvo vozduha v krupnejshih gorodah Rossii za 10 let 1998–2007 gg. Analiticheskij obzor 2009 [Air quality in Russian major cities for 10 years, 1998–2007. Analytical Review]. SPb., 134.

РД 52.04.186–89. 1991. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. М., Гос. ком. СССР по гидрометеорологии, Минздрав СССР, 691.

RD 52.04.186–89. Rukovodstvo po kontrolju zagrjaznenija atmosfery [Guidelines for the Control of air pollution]. M., Goskom. SSSR po gidrometeorologii, Minzdrav SSSR, 691.

Эльсгольц Л.Э. 1969. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М., Наука, 424.

Jel'sgol'c L.Je. 1969. Differencial'nye uravnenija i variacionnoe ischislenie [Differential equations and variations calculus]. M., Nauka, 424 (in Russian).

Яйли Е.А. 2006. Научные и прикладные аспекты управления урбанизированными территориями на основе инструмента риска и новых показателей качества окружающей среды. СПб., РИТМУ, ВВМ, 448.

Jajli E.A. 2006. Nauchnye i prikladnye aspekty upravlenija urbanizirovannymi territorijami na osnove instrumenta riska i novyh pokazatelej kachestva okruzhajushhej sredy [Scientific and applied management aspects of urbanized territories on the risk tools basis and environmental quality new indicators]. SPb., RGGMU, VVM, 448 (in Russian).

Averin G.V., Konstantinov I.S., Zviagintseva A.V. and Tarasova O.A. 2015. The Development of Multi-Dimensional Data Models Based on the Presentation of an Information Space as a Continuum. International Journal of Soft Computing, 10: 458–461.

Zviagintseva A.V. 2014. Multiparameter ranking of areas based on the analysis of data about the condition of natural and anthropogenic systems. Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, 1(6)–2(7): 76–83.

Zviagintseva A.V. 2014. Multiparameter ranking of areas based on the analysis of data about the condition of natural and anthropogenic systems. Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve, 1(6)–2(7): 76–83.