

Б.М. Десятков, А.И. Бородулин, С.Р. Сарманаев, С.С. Котлярова

О вероятности превышения концентрацией атмосферной примеси некоторого порогового значения

НИИ аэриологии ГНЦ ВБ «Вектор», пос. Кольцово Новосибирской обл.

Поступила в редакцию 9.02.2000 г.

Рассматривается задача вычисления вероятности превышения концентрацией некоторого порогового значения с использованием статистического подхода. Расчеты проводились на примере распространения двуокиси азота, выбрасываемого двумя теплоэлектростанциями г. Новосибирска. Для различных моментов времени суток и различной скорости ветра рассчитывались поля концентрации примеси и ее дисперсии и вероятность превышения в данной точке порогового значения концентрации. В результате проведенной серии расчетов было обнаружено, что исследуемая вероятность сложным образом зависит от термической стратификации атмосферы и от пространственного распределения поля концентрации атмосферной примеси. В частности, днем в летних условиях зависимость вероятности от порогового значения концентрации похожа на крутую «ступеньку». Принципиально другая картина наблюдается в ночных условиях. Графики зависимости вероятности от концентрации примеси становятся очень пологими. Эти результаты можно объяснить бимодальной структурой функции плотности вероятности концентрации атмосферной примеси.

При решении экологических задач, связанных с загрязнением атмосферы промышленными газовыми и аэрозольными примесями, в большинстве случаев ограничиваются анализом усредненных за некоторый временной интервал значений концентрации. В общем случае такой информации о характеристиках случайного процесса совершенно не достаточно. В частности, концентрация примеси в рассматриваемой области может быть как больше, так и меньше измеренного или рассчитанного среднего значения. Поэтому привлечение информации о вероятности превышения концентрацией среднего или какого-либо другого порогового значения имеет важное практическое значение. В статье эта задача рассматривается на примере моделирования распространения выбросов промышленных предприятий над реальным промышленным центром.

Функция распределения концентрации атмосферных примесей $F(C)$ была получена нами теоретически и обоснована в экспериментах на аэродинамической трубе [1]. Она имеет вид

$$F(C) = 1 + \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{C - \bar{C}}{\beta} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{C + \bar{C}}{\beta} \right) \right], \quad (1)$$

где C – мгновенное значение концентрации примеси; \bar{C} – ее математическое ожидание; $\operatorname{erf}(\dots)$ – интеграл вероятности; β – второй параметр закона распределения, связанный с дисперсией концентрации σ^2 соотношением

$$\frac{\sigma^2}{\bar{C}^2} = \operatorname{erf}(\beta_0) \left(1 + \frac{1}{2\beta_0^2} \right) - 1 + \frac{1}{\sqrt{\pi}\beta_0} \exp(-\beta_0^2); \beta_0 = \frac{\bar{C}}{b}. \quad (2)$$

Важно отметить, что закон распределения (1) описывает наличие эффекта пережимаемости концентрации примеси. Действительно, полагая в (1) $C=0$, получим $F(0) = 1 - \operatorname{erf}(\beta_0)$ – вероятность наблюдения нулевых зна-

чений концентрации. Приведенные соотношения позволяют решать широкий спектр практически важных задач (см. [2–6]).

Анализ проблемы проведем на примере распространения двуокиси азота, выбрасываемого расположенными практически в одном месте тепловыми электростанциями ТЭС-2 и ТЭС-3 г. Новосибирска. Они имеют по три трубы высотой от 60 до 120 м. Эффективная высота источников определялась по формулам [7]. Для упрощения анализа результатов расчетов и исключения влияния на результаты разнообразных факторов, связанных с неоднородностью подстилающей поверхности города (таких как термическая и орографическая неоднородность, шероховатость подстилающей поверхности, а также различные типы граничных условий на подстилающей поверхности), будем предполагать ее горизонтальную однородность.

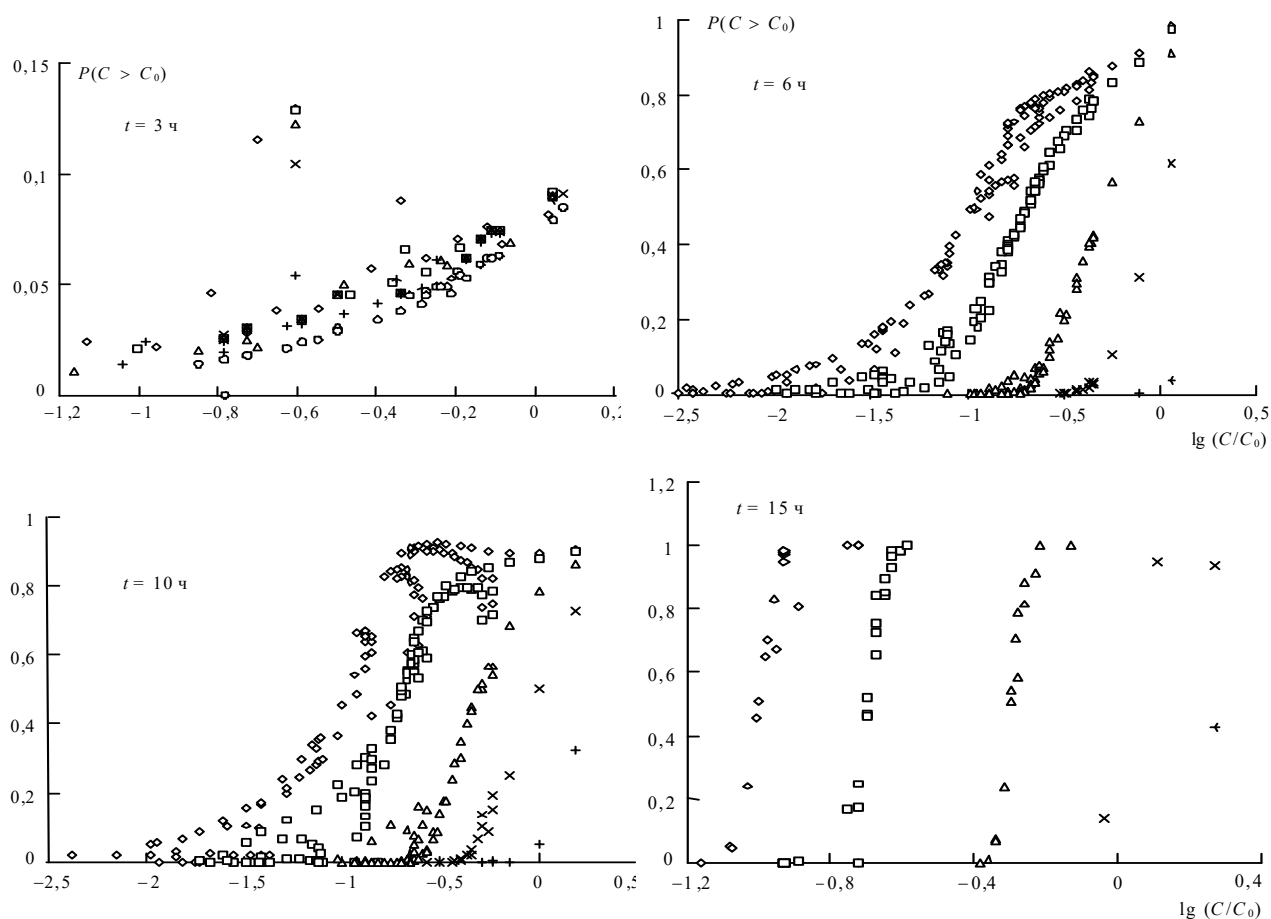
Таким образом, распространение примеси будет целиком определяться скоростью ветра, термической стратификацией атмосферы и интенсивностью турбулентного обмена. Процесс распространения примеси будем предполагать стационарным. Для различных моментов времени суток и для различной скорости ветра рассчитывались поля концентрации, дисперсия концентрации и вероятность превышения в данной точке некоторого заданного значения концентрации. Все анализируемые характеристики брались на высоте 2 м от подстилающей поверхности.

Для определения полей скорости ветра и температуры над рассматриваемой площадкой использовался численно-аналитический метод [8]. Концентрация примеси рассчитывалась решением полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии и соответствующего уравнения для дисперсии концентрации [9]. Полученные поля математического ожидания и дисперсии концентрации примеси использовались для расчетов вероятности по соотношениям (1) и (2).

На рисунке представлены вычисленные вероятности превышения концентрацией двуокиси азота некоторого

уровня C_0 для моментов времени 3, 6, 10 и 15 ч местного времени и скорости ветра 2 м/с на высоте 2 м от земли. Все величины с размерностью концентрации нормированы на предельно допустимое значение (ПДК) двуокиси азота, которое мы принимали равным $C_0 = 0,85 \cdot 10^{-4} \text{ г/м}^3$. Поскольку в ночных условиях вертикальный турбулентный обмен отсутствует, значения концентрации на уровне 2 м полу-

чилились на несколько порядков меньше, чем днем. Поэтому чтобы для ночных условий получить такие же значения концентрации на высоте 2 м, как и днем (для удобства анализа), было увеличено количество выбрасываемого ночью вещества в 1000 раз. В силу линейной зависимости концентрации примеси и ее дисперсии от мощности источника это не влияет на значения параметра β_0 .



Вероятности превышения концентрацией двуокиси азота уровня C_0 для 3, 6, 10 и 15 ч местного времени: $\diamond - C_0 = 0,1$; $\square - 0,2$; $\Delta - 0,5$; $\times - 1$; $+ - 2$; $\circ - 5$

Днем в 15 ч местного времени график зависимости вероятности от концентрации выглядел очень крутым. При $C = C_0 = \bar{C}$ с вероятностью 0,5 может наблюдаться концентрация больше, чем C . Увеличение концентрации в этой точке всего лишь на 10% приводит более чем к 30%-му увеличению вероятности. Этот результат является важным для решения практических задач. Например, если результаты измерений или расчеты показывают, что в данной точке наблюдается среднее значение концентрации, равное ПДК или чуть меньше, то это не означает, что такая ситуация относительно благополучна. В действительности, с вероятностью 0,5 может наблюдаться концентрация значительно большая, чем ПДК. А если учесть, что относительная ошибка измерений или расчетов часто превышает 10%, то в действительности в рассматриваемой точке с вероятностью более 80% может наблюдаться концентрация загрязняющей примеси значительно большая, чем ПДК.

Для 6 и 10 ч утра зависимость вероятности превышения от концентрации более пологая. Это объясняется

уменьшением турбулентного обмена и, как следствие, уменьшением дисперсии, а следовательно, и параметра β_0 . Обращает на себя внимание неоднозначность поведения вероятности от концентрации, которая особенно проявляется в 10 ч. Причина, по-видимому, в том, что дисперсия концентрации зависит не только от средних значений концентрации в данной точке пространства, но и от пространственных градиентов концентрации. Вследствие этого в точках с одинаковыми значениями математического ожидания концентрации, но с различными значениями ее дисперсии вероятности также могут быть различными. Более того, при увеличении порогового значения концентрации вероятность может даже уменьшаться. Это демонстрируют данные, приведенные для 10 ч утра.

Принципиально другая картина наблюдается в 3 ч ночи. Графики зависимости вероятности превышения концентрацией некоторого порога пологие. Для всего рассматриваемого диапазона концентраций вероятности превышения некоторого значения C_0 примерно на порядок

меньше, чем в дневных условиях. Даже для тех случаев, когда математическое ожидание концентрации многократно превышает значение C_0 , вероятность наблюдения в этой точке значений концентраций больше, чем C_0 , мала и слабо зависит от самого значения концентрации. Эти, на первый взгляд, странные результаты являются следствием бимодальной структуры функции плотности вероятности концентрации, т.е. наличия эффекта перемежаемости концентрации. При малых значениях параметра β_0 большая часть членов ансамбля мгновенных значений концентрации находится вблизи нулевого значения. Функция распределения концентрации для случая, когда β_0 мало, очень быстро достигает своего максимального единичного значения и далее очень слабо изменяется, т.е. соответствующая вероятность того, что $C > 0$, равная $P(C > 0) = \text{erf}(\beta_0)$, порядка единицы и слабо зависит от значений концентраций $C > 0$.

В таблице приведены характерные для этого случая значения исследуемых величин в одних и тех же узлах разностной сетки. Увеличение скорости ветра с 2 до 7 м/с приводит к уменьшению начального подъема факелов для рассматриваемых шести труб в среднем примерно в 8 раз и увеличению вертикального турбулентного обмена примерно в 50 раз ночью и в 1,2 раза днем. В результате этого значения концентрации ночью на высоте 2 м становятся примерно такими же, как и в дневных условиях при скорости ветра 2 м/с, а графики зависимости вероятности от концентрации в ночных условиях становятся подобными графикам в дневных условиях для одинаковых значений мощности источников. В дневных условиях увеличение скорости с 2 до 7 м/с не приводит к существенному изменению поля концентрации на высоте 2 м. Графики зависимости вероятности концентрации становятся более крутыми. Характерные для этого случая значения исследуемых величин также приведены в таблице.

Значения концентрации двуоксида азота, параметра β_0 и вероятности превышения концентрацией значения ПДК (C_0) для двух моментов времени суток и двух значений скорости ветра

$C, \text{г/м}^3$	β_0	$P(C > C_0)$	$C, \text{г/м}^3$	β_0	$P(C > C_0)$
3 ч			15 ч		
Скорость ветра 2 м/с					
$0,138 \cdot 10^{-5}$	0,01	0,01	$0,541 \cdot 10^{-6}$	1,56	0,00
$0,221 \cdot 10^{-4}$	0,03	0,03	$0,840 \cdot 10^{-5}$	6,24	0,46
$0,880 \cdot 10^{-5}$	0,03	0,03	$0,105 \cdot 10^{-4}$	3,16	0,81
$0,173 \cdot 10^{-4}$	0,10	0,11	$0,446 \cdot 10^{-4}$	3,08	0,99
Скорость ветра 7 м/с					
$0,842 \cdot 10^{-6}$	3,27	0,00	$0,110 \cdot 10^{-5}$	2,71	0,00
$0,626 \cdot 10^{-5}$	7,35	0,00	$0,793 \cdot 10^{-5}$	10,14	0,12
$0,692 \cdot 10^{-5}$	4,19	0,09	$0,134 \cdot 10^{-4}$	3,82	0,96
$0,19 \cdot 10^{-4}$	5,64	1,00	$0,415 \cdot 10^{-4}$	4,04	1,00

Следует ожидать, что для случаев с существенно неоднородной подстилающей поверхностью поле вероятности превышения некоторого заданного значения концентрации будет очень пестрым и без знания дисперсии концентрации и функции плотности вероятности практически не предсказуемым.

При решении задач, связанных с оценкой влияния загрязнения атмосферы на здоровье населения, важно знать не только вероятность превышения некоторого значения концентрации, но и время, в течение которого может на-

блюдаться превышение. Для оценки этой характеристики используем понятие перемежаемости, которая интерпретируется как вероятность наблюдения ненулевых значений концентрации, т.е. вероятность превышения концентрацией примеси нулевого уровня. Если формально обобщить понятие перемежаемости и в качестве начальной точки отсчета значений концентрации выбрать $C^* \neq 0$, то вероятность превышения концентрацией примеси данного уровня будет равна [1]:

$$P(C > C^*) = \frac{1}{2} \left[\text{erf} \left(\frac{C + C^*}{\beta} \right) + \text{erf} \left(\frac{C - C^*}{\beta} \right) \right]. \quad (3)$$

С другой стороны, для эргодических условий распространения примеси такое обобщение понятия перемежаемости можно интерпретировать как отношение времени, в течение которого наблюдаются ненулевые значения концентрации, к полному времени измерения концентрации. Условие эргодичности будет строго выполняться лишь для стационарных процессов распространения. В реальных условиях для его приближенного выполнения необходимо и достаточно, чтобы период усреднения концентрации был много больше характерного временного масштаба пульсаций концентрации и много меньше характерного времени изменения усредненных по ансамблю значений. Соблюдение этих условий вполне достижимо при наблюдении за изменением концентрации реальных атмосферных процессов [1]. Следовательно, соотношение (3) для вероятности превышения концентрацией некоторого порога одновременно является оценкой относительного времени, в течение которого наблюдается данное превышение.

Таким образом, вероятность превышения концентрацией атмосферной примеси некоторого порогового значения в реальных условиях распространения имеет сложную структуру, изменяющуюся не только во времени, но и в пространстве. Например, в двух различных точках с равными математическими ожиданиями концентрации примеси могут наблюдаться принципиально различные вероятности превышения концентрацией примеси некоторого порогового значения. В ряде случаев незначительное изменение порога может привести к резкому падению или росту вероятности превышения. Результаты работы показывают важность корректного учета статистической природы процесса распространения атмосферных примесей при решении различных прикладных задач.

1. Бородулин А.И., Майстренко Г.М., Чалдин Б.М. Статистическое описание распространения аэрозолей в атмосфере. Метод и приложения. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. 124 с.
2. Borodulin A.I., Desyatkov B.M., Sarmanov S.R. Probability Density Function of the Aerosols Deposits on the Underlying Surface // Atmosph. and Ocean. Opt. V. 9. N 6. June 1996. P. 525–527.
3. Borodulin A.I., Desyatkov B.M., Sarmanov S.R. Distribution of the Aerosol Particles Flux Emitted From an Underlying Surface // Atmosph. and Ocean. Opt. V. 10. N 9. September 1997. P. 681–684.
4. Borodulin A.I., Desyatkov B.M., Sarmanov S.R. Estimate of the Concentration Variance of an Atmospheric Admixture // Atmosph. and Ocean. Opt. V. 11. N 9. 1998. P. 854–857.
5. Borodulin A.I., Desyatkov B.M., Shabanov A.N. Distribution Function for Time During Which the Integral Concentration of an Aerosol Admixture Being Dispersed in the Atmosphere Reaches a Threshold Value // Atmosph. and Ocean. Opt. V. 11. N 10. 1998. P. 965–968.
6. Borodulin A.I., Desyatkov B.M., Lapteva N.A., Marchenko V.V. Evaluation of Aspiration Efficiency of Aerosol Particles in Turbulent Atmosphere // J. Aerosol Sci. V. 30. Suppl.1. 1999. P. 237–238.

7. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 448 с.
8. Desyatkov B.M., Sarmanaev S.R., Borodulin A.I. Numerical-analytical Model of the Aerosol Transport in a Thermally Stratified Boundary Layer of the Atmosphere // Atmosph. and Ocean. Opt. V. 9. N 6. June 1996. P. 517–520.
9. Роду В. Модели турбулентности окружающей среды // Методы расчета турбулентных течений. М.: Мир, 1984. С. 227–321.

B.M. Desyatkov, A.I. Borodulin, S.R. Sarmanaev, S.S. Kotlyarova. **About probability of exceeding some threshold value of atmospheric pollutant concentration.**

The problem of calculation of probability of exceeding some threshold values of pollutant concentration is considered with the use of statistical approach. The calculations were conducted for dispersion of nitrogen dioxide as an example, ejected by two thermal power stations of Novosibirsk. The pollutant concentration fields were calculated for different instants of day and for various values of wind velocity. The probability of exceeding at the given point of threshold value of concentration was calculated too. As a result of the conducted series of calculations, the probability under study was found to depend on thermal stratification of the atmosphere and spatial distribution of atmospheric pollutant concentration field. In particular, during the day under summer conditions the dependence of the probability on threshold values of concentration looks like a steep «step». Essentially other picture is seen under night conditions. The curves of dependence of probability on the pollutant concentration become very slant. These results can be explained by bimodal structure of the probability density function of the atmospheric pollutants concentration.