

Н.А. Меркурьева

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ЦЕНТРА

Выполнен статистический анализ данных наблюдений за содержанием нескольких загрязняющих веществ (NO_2 , SO_2 , H_2S , пыль) в атмосфере Набережных Челнов. Наряду со средними значениями, квадратическими отклонениями, асимметрией и эксцессом построены функции распределения концентрации примесей. Функция распределения нормированной концентрации обладает важным свойством автомодельности: она в пределах погрешностей измерения практически одинакова как для различных ингредиентов, так и для разных точек наблюдения. Функция распределения использована для определения вероятности превышения предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ.

По мере развития промышленности, транспорта и энергетического комплекса растет количество выбрасываемых в атмосферу загрязняющих ее примесей. На распространение примесей и изменение их содержания во времени существенное влияние оказывают метеорологические условия: скорость ветра и турбулентность, термическая стратификация, облака, туманы и осадки [1–4]. В свою очередь, облако примесей, сформировавшееся над городом, оказывает обратное влияние на состояние атмосферы: поля температуры и влажности, оптические и радиационные характеристики, условия образования облаков и туманов, режим увлажнения [5, 6, 7].

Практически все примеси антропогенного происхождения оказывают вредное воздействие на человека, флору и фауну планеты [8, 9].

В настоящей статье выполнен статистический анализ содержания загрязняющих веществ в г. Набережные Челны (Республика Татарстан) – промышленном центре с населением свыше 500 тыс. человек. Основными источниками загрязняющих веществ служат предприятия автомобилестроения (АО «КамАЗ») и энергетического комплекса, а также все виды транспорта (прежде всего автомобильного).

Измерения концентраций примесей проводятся на двух постах Гидрометеослужбы в 7, 13, 19 ч местного декретного времени. В статье использованы также данные одного из постов АО «КамАЗ». Посты 1 и 2 расположены в районе жилой застройки на расстоянии 2–6 км от заводов АО «КамАЗ». Пост 3 находится на территории завода.

В статье использованы наблюдения за 1988–1993 гг. на постах 1 и 2 и за 1989–1992 гг. на посту 3. На постах 1 и 2 анализируются наблюдения за диоксидом азота (NO_2), диоксидом серы (SO_2), сероводородом (H_2S) и пылью; на посту 3 – за NO_2 и SO_2 . Наряду с этими веществами в атмосфере всегда присутствует оксид углерода (СО), часто называемый угарным газом. Концентрация последнего также измерялась. Поскольку точность измерения концентрации СО не более 1 мг/м^3 , то данные наблюдений содержат лишь значения q , равные 0 или 1 мг/м^3 (в редких случаях более 1 мг/м^3). Естественно, что на основе таких данных построить функцию распределения q практически невозможно. По этой причине для СО определены лишь \bar{q} , σ_q , A_q и E_q .

Сведения о средних значениях концентрации (\bar{q}), средних квадратических отклонениях (σ_q), асимметрии (A_q) и эксцессе (E_q) приведены в табл. 1. Значения \bar{q} и σ_q на всех трех постах близки между собой. Исключение составляют значения \bar{q} и σ_q для SO_2 на посту 3, которые значительно превышают данные других постов. Для всех примесей асимметрия и эксцесс значительно больше нуля, что свидетельствует о том, что распределение q отличается от нормального.

Наряду со средним значением и дисперсией большой интерес представляют функция и плотность распределения концентрации загрязняющих веществ (примесей). Только с помощью функции распределения может быть оценена вероятность превышения предельно допустимой концентрации той или другой примеси.

Таблица 1

Значения $10^2 \bar{q}$ (мг/м³), $10^2 \sigma_q$ (мг/м³), A_q и E_q (N – объем выборки)

Примесь	Пост 1					Пост 2					Пост 3				
	\bar{q}	σ_q	A_q	E_q	N	\bar{q}	σ_q	A_q	E_q	N	\bar{q}	σ_q	A_q	E_q	N
NO ₂	4,9	4,8	2,5	9,9	5267	4,9	4,8	3,0	14,4	5394	3,2	3,7	2,2	7,2	2524
SO ₂	1,5	1,4	3,9	38,9	5256	1,4	1,3	3,5	31,6	5409	12,9	14,2	3,4	14,7	2548
H ₂ S	0,2	0,1	2,1	12,3	5265	0,2	0,1	1,7	11,3	5412	–	–	–	–	–
Пыль	19,1	17,2	2,4	3,6	3339	20,6	19,7	1,5	2,6	5010	–	–	–	–	–
CO	64,9	65,9	0,9	2,4	5240	65,7	67,5	0,8	1,2	5386	–	–	–	–	–

Функция распределения $F(q \leq Q)$ – это вероятность непревышения концентрацией q заданного значения Q . Она изменяется от нуля при $Q = 0$ до единицы (или 100%) при достаточно больших значениях Q : $0 \leq F \leq 1$.

В качестве примера приводим значения функции распределения для нескольких ингредиентов по данным наблюдения на постах 1 и 2.

Диоксид азота											
Q , мг/м ³	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	
F , % п.1	18,2	33,0	47,1	68,5	68,5	75,6	81,9	87,5	89,8	91,5	
п.2	16,8	30,8	46,2	68,4	68,4	76,0	82,8	89,7	91,8	91,8	
Q , мг/м ³	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40	
F , % п.1	94,2	96,0	97,5	98,2	98,8	99,3	99,6	99,8	99,9	100	
п.2	94,6	96,7	97,2	97,8	98,3	98,7	99,1	99,3	99,8	100	
Диоксид серы											
$10^2 Q$, мг/м ³	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8		
F , % п.1	14,8	16,7	21,9	23,9	50,4	53,0	58,5	62,4	63,9		
п.2	15,4	18,1	23,3	25,7	52,6	55,7	61,6	65,4	66,9		
$10^2 Q$, мг/м ³	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0	1,0	2,0	3,0	–		
F , % п.1	85,5	94,4	98,0	99,1	99,6	99,7	99,9	100	–		
п.2	81,1	92,6	97,1	99,1	99,5	99,7	100	–	–		
Сероводород											
$10^2 Q$, мг/м ³	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6					
F , % п.1	44,7	75,9	90,6	96,3	98,3	99,0					
п.2	44,9	75,2	91,1	96,0	98,8	98,8					
$10^2 Q$, мг/м ³	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0					
F , % п.1	99,6	99,8	99,8	99,9	99,9	100					
п.2	99,7	99,8	99,8	99,9	99,9	100					
Пыль											
Q , мг/м ³	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7				
F , % п.1	49,2	70,3	83,3	91,1	97,3	98,5	99,1				
п.2	47,0	66,7	80,7	88,5	95,3	96,6	97,9				
Q , мг/м ³	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	–				
F , % п.1	99,3	99,6	99,8	99,9	100	–	–				
п.2	98,7	99,1	99,7	99,8	99,9	100	–				

Характерная особенность распределения всех примесей – быстрый рост функции распределения при малых значениях q и очень медленное увеличение F при больших q .

Функция F различна не только для разных загрязняющих веществ, но и в разных точках, сезонах года и др.

Более общими свойствами обладают функции распределения, построенные для нормированных значений (q_n) концентрации:

$$q_n = (q - \bar{q}) / \sigma_q.$$

Среднее значение нормированной концентрации равно нулю, а квадратическое отклонение ее равно единице.

На рис. 1 изображены функции распределения $F(q \leq Q_n)$ нормированной концентрации q_n четырех различных веществ по данным измерения в фиксированных точках, а на рис. 2 – функции распределения одного и того же вещества в разных точках.

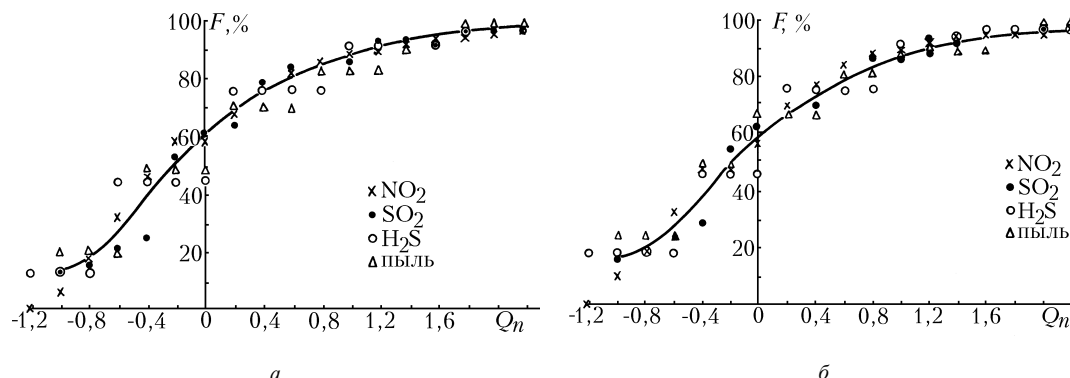


Рис. 1. Функции распределения нормированной концентрации различных веществ по данным измерений: а – пост 1; б – пост 2

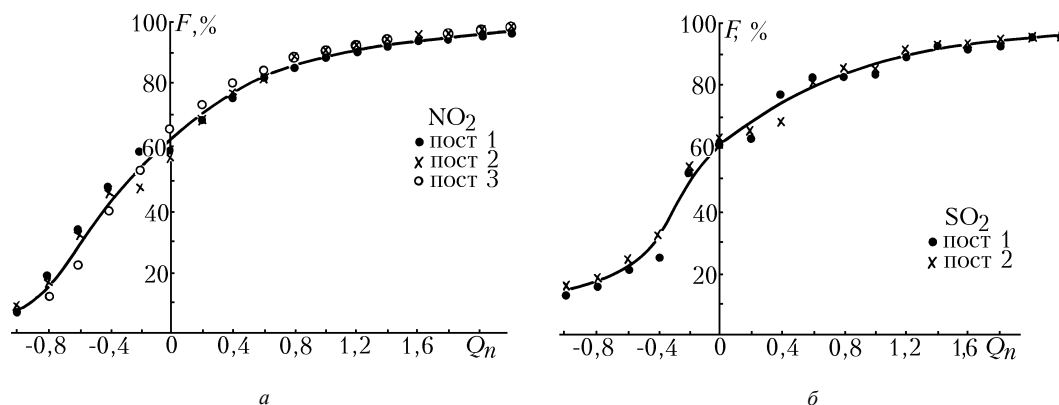


Рис. 2. Функции распределения нормированной концентрации по измерениям на всех постах: а – NO₂; б – SO₂

С учетом того, что концентрация примеси измеряется с определенной погрешностью, а объем выборок ограничен, следует признать, что распределение примесей обладает свойством автомодельности: функция распределения нормированной концентрации практически (в пределах погрешностей измерения) одинакова для разных примесей в фиксированной точке и в различных точках для одного и того же загрязнителя.

Эти данные подкрепляют вывод работы [10], установленный на основе материалов о загрязнении атмосферы г. Санкт-Петербурга.

Усредненная по постам 1 и 2 и четырем примесям функция F имеет следующие значения:

Q_n	-1,2	-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3
$F, \%$	3,9	6,5	14,9	15,1	17,9	18,4	26,9	37,3	41,6	48,1
Q_n	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$F, \%$	49,6	52,2	55,3	61,1	69,1	71,5	73,2	78,8	79,3	81,9
Q_n	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	–
$F, \%$	82,3	85,0	87,8	90,2	91,8	92,9	94,8	96,3	96,7	–

Средние абсолютные отклонения $\delta_f = \sum |(F_i - \bar{F})| / N_f$ функции F от усредненных по четырем примесям значений \bar{F} (по ним проведены сплошные кривые на рис. 1) и средние квадратические отклонения $\sigma_f = \sum [(F_i - \bar{F})^2]^{1/2} / N_f$ представлены в табл. 2 (здесь N_f – количество интервалов, на которые разбит ряд наблюдений и для которых определены значения F_i).

Легко видеть, что большая часть как абсолютных, так и квадратических отклонений функции F не превышает 3–4%. Лишь на посту 3 с меньшим объемом наблюдений эти отклонения достигают 6–7%.

Функция распределения q или q_n – тот параметр, который наиболее обоснованно позволяет оценить вероятность превышения любого заданного значения концентрации, в частности предельно допустимой концентрации (ПДК).

Таблица 2

Средние абсолютные (δ_f) и квадратические (σ_f) отклонения (%) функции распределения F

Примесь	Пост 1 ($N_f=29$)		Пост 2 ($N_f=29$)		Пост 3 ($N_f=29$)	
	δ_f	σ_f	δ_f	σ_f	δ_f	σ_f
NO ₂	3,2	2,4	3,3	2,2	7,3	6,4
SO ₂	3,9	3,8	3,5	3,4	7,2	6,5
H ₂ S	4,5	4,1	4,8	4,0	–	–
Пыль	4,2	3,4	3,8	2,5	–	–

Как известно, для оценки воздействия загрязняющих веществ на организм человека введены понятия максимально-разовой и среднесуточной ПДК: ПДК_{м.р.} и ПДК_{с.с.}.

Естественно, что для оценки вероятности превышения ПДК_{м.р.} следует использовать функции распределения q или q_n , построенные по срочным наблюдениям. Для анализируемых нами веществ значения ПДК_{м.р.} равны: NO₂ – 0,085 мг/м³, SO₂ – 0,5 мг/м³, H₂S – 0,008 мг/м³, пыль – 0,5 мг/м³. Определив для этих значений нормированные величины $Q = (\text{ПДК}_{\text{м.р.}} - \bar{q})/\sigma_q$ с помощью графиков, представленных на рис. 1 (сплошные кривые), найдем вероятность превышения ПДК_{м.р.}: она равна $100 - F$. По значениям $Q = (2 \text{ ПДК}_{\text{м.р.}} - \bar{q})/\sigma_q$ определим вероятность превышения 2 ПДК_{м.р.} и т.д. Вероятность превышения максимально-разовых ПДК мала: только по NO₂ и пыли это превышение составляет 18 и 5% соответственно.

Поскольку, однако, жители города длительное время находятся в данных условиях, то следует сравнивать концентрацию примесей с среднесуточными ПДК (равными для NO₂ – 0,04 мг/м³, SO₂ – 0,05 мг/м³, пыли – 0,15 мг/м³). Естественно, что и функции распределения следует построить для среднесуточных значений q .

Приводим для примера функции распределения среднесуточных q на посту 2.

Диоксид азота: $\bar{q} = 0,049$ мг/м ³ , $\sigma_q = 0,042$ мг/м ³ , $N = 1803$										
Q , мг/м ³	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
F , %	6,2	18,1	34,1	50,7	66,1	76,7	83,4	87,8	90,7	92,9
Q , мг/м ³	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40
F , %	95,7	96,6	97,6	97,9	98,3	98,9	99,3	99,6	99,8	100

Пыль: $\bar{q} = 0,21$ мг/м ³ , $\sigma_q = 0,165$ мг/м ³ , $N = 1674$											
Q , мг/м ³	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,1	1,1
F , %	33,1	62,7	79,7	89,6	95,7	97,6	98,6	99,1	99,3	99,7	100

Функции распределения нормированных среднесуточных концентраций, усредненные по всем примесям, имеют следующие значения:

Q_n		-1,2	-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3
F , %	п.1	3,6	7,7	9,7	10,9	16,2	23,0	28,0	30,2	41,7	45,2
	п.2	4,8	7,4	10,2	10,6	15,3	23,3	27,4	29,4	39,8	43,7
Q_n		-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
F , %	п.1	47,5	56,7	58,9	62,2	65,8	70,5	72,9	74,7	79,8	80,8
	п.2	48,0	54,0	60,5	62,4	65,5	70,9	73,9	74,7	79,6	81,5
Q_n		0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	–
F , %	п.1	83,5	85,7	86,0	88,4	91,4	93,4	94,7	96,1	96,4	–
	п.2	83,1	85,5	87,5	89,4	92,4	94,3	95,3	96,4	96,8	–

Используя эти функции, по описанной выше методике определяем вероятность превышения ПДК_{с.с.}. Согласно данным, приведенным в табл. 3, наиболее значительное превышение ПДК наблюдается по NO₂ и пыли. Концентрация их в 52 и 55% случаев превышает ПДК_{с.с.} на посту 1 и в 53 и 57% случаев – на посту 2. В целом же г. Набережные Челны, где преобладает свободная разреженная застройка, с хорошей продуваемостью жилых массивов, – менее загрязненный город, чем, например, некоторые районы Санкт-Петербурга, где вероятность превышения ПДК по NO₂ и пыли достигает 90%, 2 ПДК – 60%, 3 ПДК – более 30% случаев [10].

Таблица 3

Вероятность превышения (%) ПДК_{с.с.}

При меся	Пост 1			Пост 2		
	ПДК	2 ПДК	3 ПДК	ПДК	2 ПДК	3 ПДК
NO ₂	52	19	7	53	19	7
SO ₂	2	0	0	2	0	0
H ₂ S	0	0	0	0	0	0
Пыль	55	17	6	57	26	8

Предпринята попытка аппроксимировать функции распределения логарифмически нормальным распределением, которое имеет следующий вид:

$$F_{л.-н.}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) d\tau, \quad (1)$$

где $y = (\ln q - \ln q_0) / \sigma_{\ln q}$; $\ln q_0$ – среднее арифметическое значение логарифма концентрации, $\ln q_0 = (\ln q_1 + \ln q_2 + \dots + \ln q_n) / N$; $\sigma_{\ln q}$ – среднее квадратическое отклонение логарифма концентрации, $\sigma_{\ln q} = [\sum (\ln q_i - \ln q_0)^2] / N$.

С помощью формулы (1) были получены теоретические значения функции распределения. Приведем примеры этих значений.

				Диоксид азота							
Q , мг/м ³	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	
$F_{л.-н.}$, % п.1	13,3	32,6	47,2	57,5	65,9	71,9	76,7	80,2	83,1	85,5	
	п.2	12,7	31,9	46,8	57,5	65,9	71,9	76,7	80,3	83,4	85,7
Q , мг/м ³	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40	
$F_{л.-н.}$, % п.1	89,1	91,0	93,4	94,6	95,7	97,0	97,8	98,5	98,8	99,1	
	п.2	89,2	91,8	93,6	94,9	95,9	97,2	98,0	98,5	98,9	99,2
				Диоксид серы							
$10^2 Q$, мг/м ³	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8		
$F_{л.-н.}$, % п.1	7,6	20,9	32,9	42,5	50,0	56,3	61,7	66,3	69,8		
	п.2	8,0	22,1	34,1	44,0	51,6	58,3	63,6	68,1	71,6	
$10^2 Q$, мг/м ³	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0	1,0	2,0	3,0	–		
$F_{л.-н.}$, % п.1	73,2	83,6	89,2	94,5	96,8	98,0	99,6	99,8	–		
	п.2	74,8	84,8	90,1	95,1	97,3	98,3	99,7	99,9	–	
				Сероводород							
$10^2 Q$, мг/м ³	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6					
$F_{л.-н.}$, % п.1	35,2	66,3	81,8	89,2	93,3	95,7					
	п.2	37,4	73,2	81,8	89,0	93,0	95,6				
$10^2 Q$, мг/м ³	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0					
$F_{л.-н.}$, % п.1	97,1	98,0	98,6	98,9	99,7	99,9					
	п.2	96,8	97,7	98,4	98,8	99,7	99,8				
				Пыль							
Q , мг/м ³	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7				
$F_{л.-н.}$, % п.1	40,1	66,3	79,4	86,6	90,8	93,4	95,2				
	п.2	39,3	64,4	77,3	84,7	89,0	91,9	93,8			
Q , мг/м ³	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	–				
$F_{л.-н.}$, % п.1	96,3	97,2	97,8	98,3	98,6	98,8	–				
	п.2	95,2	96,2	96,9	97,5	97,9	98,3	–			

Таблица 4

Средние абсолютные (Δ_f) и квадратические (σ_f) отклонения функции распределения F от ее аппроксимированных значений с помощью логнормального закона

При меся	Пост 1		Пост 2	
	Δ_f	σ_f	Δ_f	σ_f
NO ₂	3,7	2,6	3,8	2,9
SO ₂	5,8	4,9	4,8	4,4
H ₂ S	3,5	3,3	4,0	3,1
Пыль	3,7	2,1	3,6	1,6

При сравнении этих значений с эмпирическими значениями функции распределения, приведенными выше, были подсчитаны средние абсолютные Δ_f и квадратические σ_f отклонения функции распределения от ее аппроксимированных значений (табл.4). Видно, что средние абсолютные отклонения не превышают 4–5%, а квадратические 3–4%.

С другой стороны, нормальный закон не удовлетворяет аппроксимации функции F . В качестве примера приведем результаты аппроксимации F с помощью нормального закона.

Диоксид азота								
Q , мг/м ³	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
F_n , %	23	31	39	47	55	63	71	77
Q , мг/м ³	0,9	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,24
F_n , %	83	88	94	97	99	99	99	100

Пыль							
Q , мг/м ³	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
F_n , %	23	27	33	39	44	50	56
Q , мг/м ³	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	–
F_n , %	61	67	72	77	81	85	–

1. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнений атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1985.
2. Безуглая Э. Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 184 с.
3. Владимиров А. М., Ляхин Ю. И., Матвеев Л. Т., Орлов В. Г. Охрана окружающей среды. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 423 с.
4. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 257 с.
5. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 253 с.
6. Клинов Ф. Я. Мезометеорология воздушного бассейна Москвы. М.: Гидрометеоздат, 1991. 344 с.
7. Матвеев Л. Т. Особенности метеорологического режима большого города // Метеорология и гидрология. 1979. N 5. С. 22–27.
8. Гаврилов А. С. Экологический программный комплекс для персональных ЭВМ. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 165 с.
9. Марчук Г. И., Кондратьев К. Я. Приоритеты глобальной экологии. М.: Наука, 1993. 261 с.
10. Матвеев Ю. Л., Матвеев Л. Т. Функция и плотность распределения загрязняющих веществ и температуры воздуха // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 2. С. 244–249.

Российский государственный гидрометеорологический институт,
Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
10 ноября 1995 г.

N. A. Merkur'eva. Statistical Analysis of Atmospheric Contamination over Industrial Center.

Statistical analysis of observational data on some contaminants (NO₂, SO₂, H₂S, dust) contents in the atmosphere of Naberezhny Chelny town has been performed. Mean, standard deviation, asymmetry, kurtosis as well as distribution function for the contaminants concentration were constructed. The distribution function of normalised concentration has an important property of self-similarity: within the error limits it is practically similar both for various ingredients and for different observation points. The distribution function was used to determine the probability of the contaminants maximum permissible concentration (MPC) excess.