

РАСЧЕТ РАССЕИВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ

И. К. Астанин, Н. Н. Астанина

*Воронежский государственный университет
Московский государственный социальный университет*

Предлагаемая методика расчета загрязнения территории промышленного центра г. Воронежа тяжелыми металлами с учетом влияния конкретных промышленных объектов в локальном и региональном масштабе позволяет идентифицировать выбросы ЗВ промышленных предприятий г. Воронежа и выбросы промышленных предприятий сопредельных областей, выделить региональную составляющую в загрязнении ТПК г. Воронежа, оценить концентрацию загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и снеге в непосредственной близости от промышленного источника ЗВ и на расстоянии 100 км и более от промышленного предприятия. При использовании предложенной модели может быть рассчитана как максимально-разовая, так и усредненная сезонная, годовая концентрация заданного загрязняющего вещества в любой определенной точке воздействия с использованием данных об эмиссии и местных метеорологических условий.

В настоящее время отсутствует единая физико-математическая модель, способная объяснить и учесть все многочисленные аспекты проблемы атмосферной диффузии. Существуют два главных подхода к решению задачи о рассеянии вещества в движущейся жидкой или газообразной среде в зависимости от тех или иных факторов, характеризующих среду и источник, – это теория градиентного переноса (или полуэмпирическая теория диффузии) и статистическая теория диффузии. Полуэмпирическая теория основана на свойствах движения примеси относительно систем координат, фиксированной в пространстве, т.е. она является эйлеровой. Статистическая теория рассматривает диффузию как турбулентность в переменных Лагранжа. Между этими подходами существует близкая связь, они описывают одно и то же явление, однако области их применения не всегда перекрываются. Имеется ряд задач атмосферной диффузии, где рассмотрение возможно только на основе одной из этих теорий. Для г. Воронежа лучшие результаты дает совместное применение данных теорий.

На данный момент в России действует нормативный документ (ОНД-86) «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» [6], в основе которого лежит численное решение

уравнения турбулентной диффузии и уравнений гидродинамики.

Полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии при условии однородности основного движения по осям x и y и обычных приемов осреднения турбулентных характеристик, состоящих из средних и пульсационных компонент, записанное для концентрации примеси c , имеет вид [2]

$$\frac{dc}{dt} + u \frac{dc}{dx} + v \frac{dc}{dy} + w \frac{dc}{dz} = \frac{d}{dx} k_x \frac{dc}{dx} + \frac{d}{dy} k_y \frac{dc}{dy} + \frac{d}{dz} k_z \frac{dc}{dz} - \alpha c, \quad (1)$$

где оси x и y расположены в горизонтальной плоскости, ось z – по вертикали, t – время, u, v, w – составляющие средней скорости перемещения примеси соответственно по направлению осей x, y, z , k_x, k_y, k_z – горизонтальные и вертикальная составляющие коэффициента обмена, α – коэффициент, определяющий изменения концентрации за счет превращения примеси.

Решение полуэмпирического уравнения широко применяют для расчетов рассеяния примеси в атмосфере. Оно особенно удобно при учете вертикальной неоднородности стратификации атмосферы и взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью.

Для определения границ применимости формул, использованных в [6], в качестве промежуточных введены параметры f и v_m

$$f = 10^3 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta T} \text{ м/(с}^2 \cdot \text{°C)}, \quad v_i = 0,653 \sqrt{\frac{V_1 \Delta T}{H}} \text{ м/с}, \quad (2)$$

где w_0 – средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса, м/с; D – диаметр устья источника выброса, м; H – высота источника выброса над уровнем земли, м; ΔT – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси T_r и температурой окружающего атмосферного воздуха T_v , °C; $V_1 = \pi R_0^2 w_0$ – объем выбросов, м³/с.

Данные параметры служат для вычисления опасной скорости ветра, деления выбросов на нагретые и холодные, определения приземной концентрации и расстояния до точки ее максимума.

В работе [1] максимальную разовую концентрацию c_m (мг/м³) для нагретых выбросов из N близко расположенных одинаковых труб (для одиночной трубы $N = 1$) рассчитывают по формуле [7]:

$$c_m = \frac{AMFmn}{H^2} \sqrt[3]{\frac{N}{V\Delta T}}, \quad (3)$$

где $A = 0,3(k_1 / u_1 \varphi_0)_{u_1=2 \text{ м/с}}$ – коэффициент, который зависит от температурной стратификации атмосферы, определяющей интенсивность вертикального и горизонтального перемешивания в атмосфере, при условии неблагоприятного сочетания этих факторов (для центральной части России $A = 120$), $c^{2/3} \cdot c^{1/3}$; M – количество вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу из труб, г/с; F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе; m и n – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса; H – высота источника над поверхностью земли, м; V – объем дымовых газов, выходящий из N труб: $V = \pi D^2 w_0 N / 4$ (в случае $N = 1$ V обозначается V_1), м³/с. $F = 1$ для газовой смеси и мелкодисперсных аэрозолей, скорость упорядоченного оседания которых практически равна нулю. Для выбросов грубодисперсной пыли (зола) $F = 2$ (если средний эксплуатационный КПД пылеочистки не менее 90%), $F = 2,5$, если КПД равен 75–90%, при КПД менее 75% $F = 3$.

Коэффициенты m и n выражаются интерполяционными формулами:

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}} \quad (4)$$

$$n = \begin{cases} 3 & (v_m \leq 0,3) \\ 3 - \sqrt{(v_m - 0,3)(4,36 - v_m)} & \\ 1 & (v_m > 2) \end{cases} \quad (5)$$

Расстояние x_m от источника, где достигается c_m , определяется по формуле

$$x_m = d_0 H, \quad (6)$$

$$\text{где } d_0 = (5 - F)d / 4 \quad (7)$$

Величина d определяется с помощью интерполяционных формул

$$d = 4,95 v_m (1 + 0,28\sqrt[3]{f}) \text{ при } (v_m \leq 2) \text{ и}$$

$$d = 7\sqrt{v_m} (1 + 0,28\sqrt[3]{f}) \text{ при } (v_m > 2) \quad (8)$$

Величина опасной скорости ветра u_m м/с на высоте 10 м (высота флюгера), при которой достигается c_m , определяется по формуле

$$\text{при } v_m \leq 0,5 \text{ м/с } u_m = 0,5;$$

$$\text{при } 0,5 < v_m \leq 2 \text{ м/с } u_m = v_m;$$

$$\text{при } v_m > 2 \text{ м/с } u_i = v_i (1 + 0,12\sqrt[3]{f}) \quad (9)$$

Максимальная концентрация c_{mi} при неблагоприятных метеорологических условиях и скорости ветра $u \neq u_m$ и расстоянии x_{mi} , где она достигается, вычисляются в зависимости от $\xi = u/u_m$ по формулам:

$$c_{mi} = r c_m, \quad (10)$$

$$x_{mi} = \rho x_m, \quad (11)$$

где r – безразмерная величина, определяемая в зависимости от отношения u_m / u_m по формулам:

$$\text{при } u/u_m \leq 1$$

$$r = 0,67(u/u_m) + 1,67(u/u_m)^2 - 1,34(u/u_m)^3;$$

$$\text{при } u/u_m > 1 \quad r = \frac{3u/u_m}{2(u/u_m)^2 - (u/u_m + 2)}; \quad (12)$$

ρ – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения u/u_m по формулам:

$$\text{при } u/u_m \leq 0,25 \quad \rho = 3;$$

$$\text{при } 0,25 < u/u_m \leq 1 \quad \rho = 8,43(1 - u/u_m)^5 + 1;$$

$$\text{при } u/u_m > 1 \quad \rho = 0,32(u/u_m) + 0,68. \quad (13)$$

Величины приземных концентраций вредных веществ c по оси факела на расстоянии x от источника с подветренной от него стороны определяются по формуле

$$c = S_1 c_m \quad (14)$$

где S_1 – безразмерная величина, определяемая при опасной скорости ветра в зависимости от отношения x/x_m по формулам:

$$\begin{aligned} \text{при } x/x_m \leq 1 S_1 &= 3\left(\frac{x}{x_m}\right)^4 - 8\left(\frac{x}{x_m}\right)^3 + 6\left(\frac{x}{x_m}\right)^2; \\ \text{при } 1 < x/x_m \leq 8 S_1 &= \frac{1,13}{0,13\left(\frac{x}{x_m}\right)^2 + 1} \end{aligned} \quad (15)$$

при $x/x_i > 8$ и $F = 1$

$$S_1 = \frac{x/x_m}{[3,58(x/x_m)^2 - 35,2(x/x_m) + 120]};$$

при $x/x_m > 8$ и F , равном 2; 2,5 или 3,

$$S_1 = \frac{1}{[0,1(x/x_m)^2 + 2,47(x/x_m) - 17,8]}.$$

С наветренной от источника стороны концентрации практически равны нулю. Начало координат располагаются в источнике, ось x ориентирована вдоль ветра, ось y – перпендикулярна ей.

Значения концентраций вредных веществ на оси факела при других скоростях ветра u и неблагоприятных метеорологических условиях находятся по формуле:

$$c = S_1 c_{ми} \quad (16)$$

причем, S_1 определяется по формулам (15) при $x/x_{ми}$.

Величина приземных концентраций на расстоянии y от оси факела находится по формуле:

$$c_y = S_2 c, \quad (17)$$

где S_2 является функцией $u(y/x)^2$:

$$S_2 = 1/[1 + 8,4u(y/x)^2][1 + 28,2u^2(y/x)^4] \quad (18)$$

Однако методика [6] позволяет сделать расчет только максимально-разовых концентраций (осредненных за 20-30 мин.). Автором была разработана модель расчета средних концентраций воздушных загрязнителей за длительный промежуток времени (месяц, сезон, год).

В [4] приводится зависимость концентрации от времени осреднения

$$c_1(\tau_1)/c_2(\tau_2) = (\tau_2/\tau_1)^{0,2}, \quad (19)$$

где c_1 и c_2 – концентрации, относящиеся к периодам времени τ_1 , и τ_2 .

Соотношение (19) может быть использовано для прогностических оценок концентраций примесей в приземном слое воздуха, осредненных за лю-

бой период времени при условии, что имеется возможность рассчитать или измерить приземную концентрацию для некоторого заданного периода осреднения.

При оценке концентраций, осредненных за длительный период времени, следует учитывать повторяемость несущего направления ветра или вытянутость соответствующей розы ветров p/p_0 , представляющую собой отношение реальной повторяемости несущего направления ветра p к повторяемости его при круговой розе ветров p_0 , т. е. при равновероятности всех направлений. Для восьми-румбовой розы ветров $p_0 = 0,125$. Таким образом, при определении долгопериодных концентраций c_d , осредненных за период τ_d по концентрациям c_k , осредненным за короткий период τ_k , следует пользоваться соотношением

$$c_d/c_k = \alpha(p/p_0), \quad (20)$$

где $\alpha = 1/2(\tau_k/\tau_d)^{0,2}$; p/p_0 – параметр вытянутости розы ветров, характеризующий период τ_d . Данное соотношение позволяет использовать наиболее удобные и эффективные методики расчета приземных концентраций для оценки загрязнения атмосферы при разных периодах действия источника и разных периодах сбора и осреднения метеорологической информации.

Поскольку концентрация примесей на значительном удалении от источников сравнительно мала, для анализа ее изменения существенное значение приобретают работы по моделированию, т.е. расчету распространения примесей на дальние расстояния. С данной целью строится траектория движения воздуха и вдоль нее определяется «сухое» и «влажное» выпадение загрязняющих веществ на землю.

Взаимоотношение между сухими и влажными выпадениями зависит от ряда факторов, главными из которых являются: длительность холодного периода, в течение которого сохраняется снежный покров, частота снегопадов и их интенсивность, физико-химические свойства загрязняющих веществ, размер аэрозолей.

Снежный покров обладает рядом свойств, делающих его удобным индикатором загрязнения не только самих атмосферных осадков, но и атмосферного воздуха, а также последующего загрязнения вод и почв. При образовании и выпадении снега в результате процессов сухого и влажного вымывания концентрация загрязняющих веществ в нем оказывается обычно на 2-3 порядка величины

выше, чем в атмосферном воздухе. Поэтому измерения содержания этих веществ могут производиться достаточно простыми методами и с высокой степенью надежности. Отбор проб снежного покрова чрезвычайно прост и не требует сложного оборудования по сравнению с отбором проб воздуха. Послойный отбор проб снежного покрова позволяет получить динамику загрязнения за зимний сезон, а всего лишь одна проба по всей толще снежного покрова дает представительные данные о загрязнении в период от образования устойчивого снежного покрова до момента отбора пробы.

Снежный покров позволяет решить проблему количественного определения суммарных параметров загрязнения (сухих и влажных выпадений). Снежный покров как естественный планшет-накопитель дает действительную величину сухих и влажных выпадений в холодный сезон.

Имеется ограниченное число работ, которые позволяют дать количественное описание отдельных сторон процесса вымывания загрязняющих веществ снегом.

В работе [9] определен коэффициент концентрирования

$$W = \frac{c_{\text{сн}}}{c_{\text{возд}}} = \frac{c_{\text{сн}} \rho}{c_{\text{возд}}}, \quad (21)$$

где $c_{\text{сн}}$ и $c_{\text{возд}}$ – массовая концентрация в снеге и воздухе соответственно, г/г; $c_{\text{возд}}$ – объемная концентрация в воздухе, г/см³; ρ – плотность воздуха, г/см³.

В практике часто используют объемный коэффициент концентрирования,

$$W_0 = W / \rho \approx 775W, \quad (22)$$

который характеризует концентрирование загрязняющих веществ в единичном объеме воды осадков по отношению к тому же объему воздуха.

Коэффициенты концентрирования различных антропогенных и природных веществ снегом W даны в работе [8].

Связь между загрязнением свежеснегавшего снега и атмосферного воздуха определяется соотношением (21). Для снежного покрова с учетом его формирования за весь зимний период необходимо учесть вклад сухих выпадений. В [3] доля сухих выпадений обозначена через α , $\bar{c}_{\text{сн}}$ – средняя концентрация в снежном покрове, средняя концентрация в атмосферном воздухе определяется следующим образом:

$$\bar{c}_{\text{возд}} = \frac{\bar{c}_{\text{сн}} (1 - \alpha) \rho}{W} = \frac{\bar{c}_{\text{сн}} \rho}{\bar{W}}, \quad (23)$$

где $\bar{W} = W / (1 - \alpha)$ – среднее за зимний период значение коэффициента концентрирования с учетом сухих выпадений, он может быть определен непосредственно из наблюдений концентрации в воздухе и снеге без специального определения доли сухих выпадений.

Между накоплением массы загрязняющих веществ в снежном покрове и выбросами устанавливается связь, выраженная отношением $M / M_{\text{в}} = \alpha$. Величина $(1 - \alpha)$ составляет долю массы вещества, поступающую в дальний перенос и рассеивающуюся за пределами ближнего следа. В [5, 3] приведены значения α элементов и соединений.

Таким образом, по модели, изложенной выше, могут быть рассчитаны средние сезонные концентрации загрязняющих веществ от совокупности точечных источников в атмосферном воздухе, прослежен путь распространения примесей с учетом метеорологических параметров и нанесен на соответствующую карту, затем, используя коэффициенты концентрирования, могут быть определены концентрации указанных веществ в снеге, средние за период снегонакопления. Полученные данные могут служить для определения уровней загрязнения, определения вещественного состава и мощности выбросов предприятий, доли вещества, увлекаемого в дальний и локальный перенос.

Разработанная модель тестировалась с использованием экспериментальных данных о загрязнении воздуха железом и марганцем и их соединениями предприятиями г. Воронежа и НЛМК (данные инвентаризации выбросов данных предприятий).

Метеорологические характеристики зимы 2002 г. следующие.

Время существования снежного покрова – 133 дня. От начала установления снежного покрова до момента отбора проб – 113 дней. Количество осадков – 153 мм. Количество дней с осадками – 61. Средняя интенсивность осадков во время снегопада – 0,22 мм/ч.

Средняя скорость ветра в зимний период 3,9 м/с. Результаты расчета представлены на рис.

Расчетные и измеренные значения концентраций в точках наблюдений представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 1

Повторяемость направлений ветра (год) без штилей

Направление	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Повторяемость, %	12	13	11	14	10	13	15	12

Таблица 2

Средняя температура наиболее холодного периода

Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель
5,5	-1,5	-7,1	-10,3	-9,5	-4,4	5,5

Таблица 3

Расчетные и измеренные концентрации Fe и его соединений, Mn и его соединений в атмосферном воздухе

№ поста	Концентрация Fe и его соединений, мг/м ³			Концентрация Mn и его соединений, мг/м ³			Местонахождение поста наблюдения
	расчетные по выбросам предприятий г. Воронежа	расчетные по выбросам предприятий г. Воронежа и НЛМК	измеренные	расчетные по выбросам предприятий г. Воронежа	расчетные по выбросам предприятий г. Воронежа и НЛМК	измеренные	
1	0,9984	26,6274	27,7865	4,2679	34,4355	35,8765	Лесная зона
2	1,5984	27,2274	28,1234	6,2679	36,4355	37,4321	ЦПК
3	2,4984	28,1274	29,1211	9,2679	39,4355	40,0451	пр-т Революции
4	1,9984	27,6274	28,5643	7,2679	37,4355	38,9655	Водохранилище
5	1,0984	26,7274	27,5128	3,2679	33,4355	34,7651	Отрощка
6	2,3984	28,0274	30,2341	7,2679	27,4355	29,0203	Авиазаовд
7	2,2984	27,9274	28,1765	6,2679	26,4355	27,4312	Ул. П. Осипенко
8	9,984	25,613	26,2417	3,2679	23,4355	24,9856	Ул. Антона Овсиенко
9	1,5984	27,2274	28,4325	6,2679	26,4355	27,91	Ул. Хользунова
10	2,2984	17,9274	18,9876	7,2679	27,4355	28,4315	Ул. Солнечная
11	2,2984	17,9274	19,0235	7,2679	27,4355	29,6718	Ул. Еремеева
12	2,2984	17,9274	18,6753	9,2679	29,4355	30,0986	Ул. Бахметьева
13	1,8984	27,5274	27,9987	5,2679	25,4355	26,1617	Ул. О. Дундича
14	1,9984	17,6274	18,4567	5,2679	23,4355	24,9981	Ул. Кривошеина
15	1,9984	17,6274	18,0521	5,2679	23,4355	24,6549	Ул. Краснознаменная

Таблица 4

Расчетные и измеренные концентрации Fe и его соединений, Mn и его соединений в снеге

№ поста	Концентрация Fe и его соединений, мг/дм ³			Концентрация Mn и его соединений, 10 ⁻³ мг/дм ³			Местонахождение поста наблюдения
	расчетные по выбросам предприятий г. Воронежа	расчетные по выбросам предприятий г. Воронежа и НЛМК	измеренные	расчетные по выбросам предприятий г. Воронежа	расчетные по выбросам предприятий г. Воронежа и НЛМК	измеренные	
1	0,0098	0,26239	0,2862	0,3591	2,8974	2,9897	Лесная зона
2	0,0158	0,2683	0,2996	0,5273	3,0657	3,0678	ЦПК
3	0,0246	0,27717	0,3654	0,7798	3,3181	3,6198	пр-т Революции
4	0,0128	0,26534	0,3025	0,4432	2,9815	3,8297	Водохранилище
5	0,0108	0,26337	0,3678	0,2749	2,8133	3,5732	Отрощка
6	0,0236	0,27618	0,3903	0,6115	2,3084	3,561	Авиазаовд
7	0,0226	0,2752	0,3234	0,6115	2,3084	3,8236	Ул. П. Осипенко
8	0,0984	0,25239	0,2867	0,2749	1,9719	1,897	Ул. Антона Овсиенко
9	0,0158	0,2683	0,2967	0,5273	2,2243	3,0897	Ул. Хользунова
10	0,0226	0,17666	0,1966	0,6115	2,3084	3,5876	Ул. Солнечная
11	0,0226	0,17666	0,2234	0,6115	2,3084	2,7822	Ул. Еремеева
12	0,0226	0,17666	0,2387	0,7798	2,4767	2,8476	Ул. Бахметьева
13	0,0187	0,27125	0,3243	0,4432	2,1401	2,2597	Ул. О. Дундича
14	0,0197	0,1737	0,2052	0,4432	1,9719	2,0972	Ул. Кривошеина
15	0,0197	0,1737	0,1983	0,4432	1,9719	2,0865	Ул. Краснознаменная

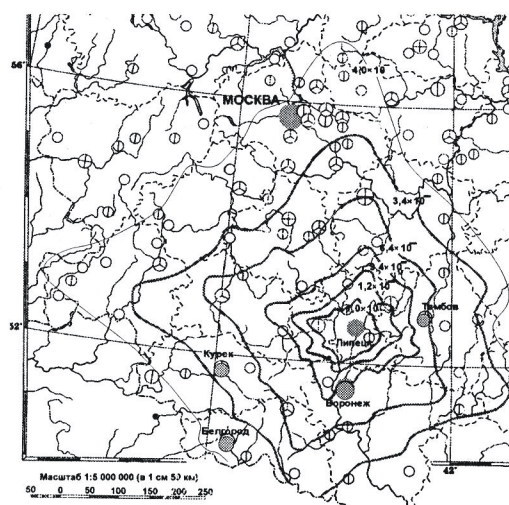
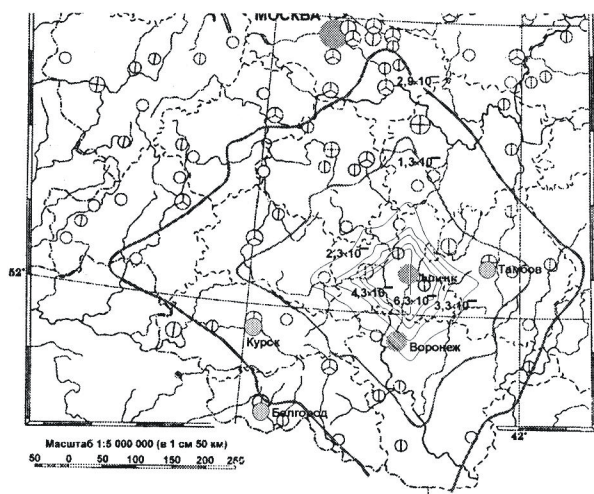


Рис. Расчетные концентрации железа и марганца и их соединений (предприятия г. Воронежа и НЛМК)

Анализ полученных данных показывает хорошую сходимость результатов замеров и расчета концентраций железа и его соединений, марганца и его соединений с учетом регионального переноса (от НЛМК) примесей. Более низкие значения расчетных данных по сравнению с измеренными связаны с недостаточным учетом в расчетах некоторых источников выбросов, особенно мелких.

Региональный перенос примесей от НЛМК увеличивает концентрации в атмосферном воздухе рассматриваемых веществ на территории г. Воронежа в 10 и более раз.

Приведенные результаты показывают, что разработанная модель может быть успешно использована для расчета долгопериодных средних концентраций от промышленных источников с учетом локальной, региональной составляющей выбросов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М.Е. Об усовершенствовании методов расчета загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд // Тр. / Гл. геофиз. обсерватория. – 1987. – Вып. 511. – С. 3-23.

2. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.

3. Василенко В.Н. Мониторинг загрязнения снежного покрова / В.Н. Василенко, И.М. Назаров, Ш.Д. Фридман. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 185 с.

4. Допустимые выбросы радиоактивных и химических веществ в атмосферу / Е.Н. Теворовский [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.

5. Лебедев В.И. Основы энергетического анализа геохимических процессов / В.И. Лебедев. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1957. – 341 с.

6. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86). – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 94 с.

7. Оникул Р.И. О новой методике расчета загрязнения атмосферы промышленными выбросами / Р.И. Оникул // Проблемы контроля и обеспечения чистоты атмосферы. – Л., 1975. – С. 21-31.

8. Trace elements in the atmospheric environment / D.H. Peirson [et al.]. – Nature. – 1973. – Vol. 241, N 5387. – P. 252-256.

9. Scott B.C. Sulfate washout ratios in winter storms / B.C. Scott // J. Appl. Meteorol. – 1981. – Vol. 20. – P. 619-625.