

О.В. Боталова, А.И. Бородулин, С.С. Котлярова

Оценка плотности осадка атмосферной примеси в городском снежном покрове

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

Поступила в редакцию 27.11.01 г.

С использованием полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии проведены модельные расчеты плотности осадка атмосферной примеси в городском снежном покрове. Обсуждаются особенности суточного накопления примеси на подстилающей поверхности при различных метеоусловиях и расположении источника.

Введение

Снег является естественным аккумулятором загрязнений, поступающих из атмосферы на подстилающую поверхность в зимний период. Ранее в ГНЦ ВБ «Вектор» проводились исследования содержания в снежном покрове ряда вредных химических атмосферных примесей для оценки экологической обстановки в регионе. НИИ аэробиологии ГНЦ ВБ «Вектор» в рамках интеграционного проекта СО РАН «Аэрозоли Сибири» проводит систематическое изучение биогенных загрязнений в снежном покрове г. Новосибирска [1, 2]. В соответствии с этим целесообразно также осуществлять оценку плотности осадка атмосферной примеси в снежном городском покрове с помощью методов математического моделирования. С этой целью в данной работе были поставлены следующие задачи:

1. Оценить закономерности изменения плотности осадка, накопленного за сутки в точке с координатами x, y , в зависимости от метеорологических условий, высоты источника и размера частиц примеси.
2. Определить закономерности изменения суммарного количества осевшего за сутки на подстилающей поверхности вещества в зависимости от упомянутых выше условий.

Ранее нами с помощью математического моделирования рассеяния атмосферных примесей рассматривалась циркуляция атмосферного воздуха над урбанизированными территориями, приводящая к появлению над городами аэрозольных «шапок», в которых происходят накопление и специфическая трансформация атмосферной примеси [3, 4]. Данная работа использует методы, описанные в [3, 4], и содержит анализ модельных расчетов плотности осадка атмосферной примеси в снежном городском покрове.

Методика и условия расчетов

Расчеты рассеяния примеси проводились численным решением полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии [5]:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{C}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} K_{ij} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} = \bar{Q} \quad (i, j = \overline{1, 3}), \quad (1)$$

где \bar{C} и \bar{U}_i – математические ожидания концентрации примеси и компонент скорости ветра; K_{ij} – компоненты тензора коэффициентов турбулентной диффузии (в работе принималось $K_{ij} = 0$ при $i \neq j$); \bar{Q} – член, описывающий источники примеси; $x = x_1$ и $y = x_2$ соответствуют горизонтальным координатам, а $z = x_3$ – вертикальной; t – время. По повторяющимся индексам подразумевается суммирование. Для учета гравитационного осаждения частиц примеси к z компоненте скорости ветра добавлялась скорость седиментации частиц V_s .

Решение задачи производилось в прямоугольном параллелепипеде G с поверхностью S , состоящей из боковой поверхности Σ , нижнего основания Σ_0 (при $z = 0$) и верхнего основания Σ_H (при $z = H$). Основание параллелепипеда представляло собой квадрат площадью 36×36 км. Город был представлен квадратом (64 км^2) в центре прямоугольной области Σ_0 . Вертикальная координата расчетной области была ограничена высотой H пограничного слоя атмосферы, равной 1,5 км. Система начального и граничных условий для (1) выглядела следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{C}(x, y, z, 0) &= 0; \quad \bar{C} = 0 \quad \text{на } \Sigma, \Sigma_H; \\ -K_{zz} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} + V_s \bar{C} &= \beta \bar{C} \quad \text{на } \Sigma_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где β – параметр взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью. В расчетах принималось $\beta = 0,02$.

Решению полуэмпирического уравнения предшествовало определение полей компонент среднего значения скорости ветра. Эта задача решалась с помощью численно-аналитической модели [6]. Расчеты проводились в следующем порядке. Сначала с интервалом 1 ч определялся суточный ход компонент сред-

него значения скорости ветра. Эти расчеты проводились для метеорологических условий, типичных для зимы в районе г. Новосибирска. Затем решением уравнения (1) определялись поля концентрации примеси и плотность ее осадка на подстилающей поверхности от точечного стационарного источника примеси. Член, описывающий источник в (1), задавался в виде

$$\bar{Q} = Q_0 \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0), \quad (3)$$

где $Q_0 = 10^3$ г/с – мощность источника; x_0, y_0, z_0 – координаты источника. Поток частиц $p(x, y, t)$ на подстилающую поверхность в точке с координатами x, y в момент времени t определялся по формуле

$$p(x, y, t) = -V_s \bar{C} + K_{zz} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \quad \text{при } z = 0, \quad (4)$$

а плотность осадка в точке с координатами x, y , накопленная за время $T = 24$ ч:

$$P(x, y) = \int_0^T p(x, y, t) dt. \quad (5)$$

Суммарное количество осевшего за сутки на подстилающей поверхности вещества P_{Σ_0} определялось интегрированием (5) в пределах области Σ_0 . Расчеты проводились для следующих условий. Рассматривались два варианта положения источника: в центре города и в 2 км от западной границы города на высоте 100 и 400 м. Учитывались следующие метеоро-

логические условия: штиль и западный ветер со скоростью 2 м/с. Рассматривалось два типа примеси: диаметр частиц 2 и 10 мкм.

Анализ результатов расчетов

В табл. 1 и 2 приведены результаты расчетов максимальных значений $P(x, y)$ и P_{Σ_0} соответственно. Когда источник примеси находится в центре города на высоте 100 м, то при штилевых условиях максимальное значение $P(x, y)$ (см. табл. 1) находится вблизи координат x_0, y_0 источника. Плотность осадка монотонно убывает от центра города к его периферии и практически исчезает в пригороде (рис. 1, а). Это характерно для примеси обоих типов.

При наличии ветра максимум плотности осадка уменьшается в 2 раза (см. табл. 1), его положение смещается в восточную часть города на 2 км от его центра. При этом осадок распределяется в восточной части города, окраине и пригороде (рис. 1, б). При наличии ветра в центре города плотность осадка уменьшается в 1,9 раза по сравнению со штилевыми условиями. Диаметр частиц незначительно влияет на величину и распределение основного количества примеси при изменении метеорологических условий. При наличии ветра суммарное количество вещества, выпавшего за сутки на подстилающую поверхность, в 1,4 раза больше данного показателя при штилевых условиях (см. табл. 2).

Таблица 1

Диаметр частиц, мкм	Рассчитанные значения $P(x, y)$, г/м ²			
	Источник в центре города		Источник за городом	
	Метеорологические условия			
	штиль	ветер	штиль	ветер
	<i>Источник на высоте 100 м</i>			
2	0,38	0,20	0,20	0,40
10	0,40	0,20	0,20	0,40
	<i>Источник на высоте 400 м</i>			
2	0,065	0,020	0,030	0,030
10	0,073	0,020	0,038	0,030

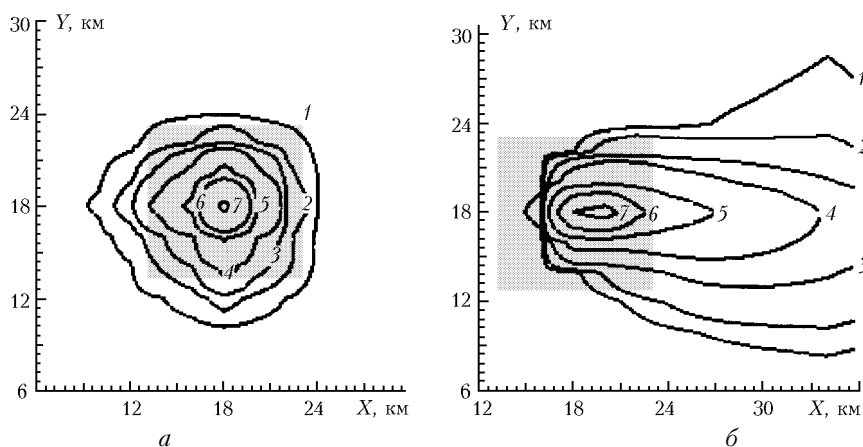


Рис. 1. Изолинии $P(x, y)$ при положении источника в центре города на высоте 100 м (а – штиль; б – ветер). Цифрам 1–6 соответствуют значения $0,4 \cdot 10^{-3}$; $0,1 \cdot 10^{-2}$; $0,4 \cdot 10^{-2}$; $0,1 \cdot 10^{-1}$; $0,4 \cdot 10^{-1}$; $0,1 \cdot 10^0$; 7 – $0,38 \cdot 10^0$ (а) и $0,2 \cdot 10^0$ (б) г/м². Область города выделена серым цветом

Таблица 2

Рассчитанные значения $P_{\Sigma 0}$, г				
Диаметр частиц, мкм	Источник в центре города		Источник за городом	
	Метеорологические условия			
	штиль	ветер	штиль	ветер
	<i>Источник на высоте 100 м</i>			
2	5,17	7,08	4,13	9,92
10	6,22	7,57	5,03	10,5
	<i>Источник на высоте 400 м</i>			
2	1,74	1,89	1,93	3,21
10	3,35	2,10	2,83	3,41

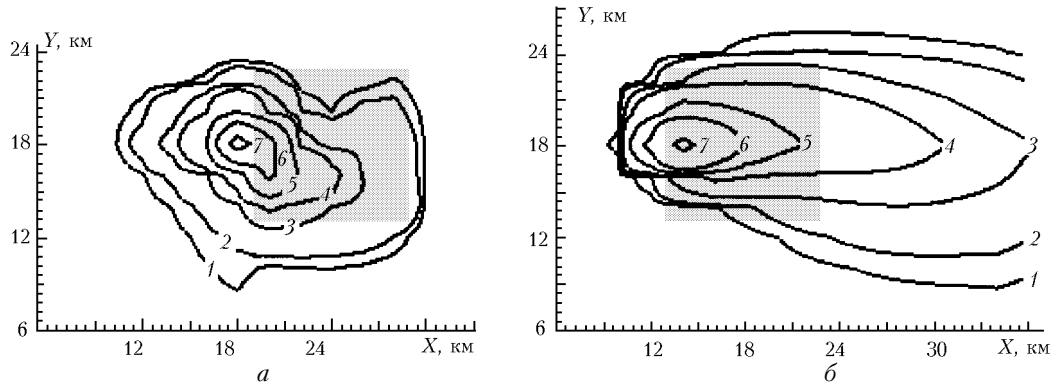


Рис. 2. Изолинии $P(x, y)$ при положении источника на окраине города на высоте 100 м (*a* – штиль; *б* – ветер). Цифрам 1–6 соответствуют значения $0,4 \cdot 10^{-3}$; $0,1 \cdot 10^{-2}$; $0,4 \cdot 10^{-2}$; $0,1 \cdot 10^{-1}$; $0,4 \cdot 10^{-1}$; $0,1 \cdot 10^0$; 7 – $0,2 \cdot 10^0$ (*a*) и $0,4 \cdot 10^0$ (*б*) г/м². Область города выделена серым цветом

При расположении источника примеси на высоте 100 м в 2 км от западной границы города и штилевых условиях максимальное значение плотности осадка примеси зафиксировано за городом вблизи источника (см. рис. 2, *a* и табл. 1). Осадок распределяется в пределах западной части пригорода и занимает большую часть города.

В этих же условиях при наличии ветра максимальное значение плотности осадка увеличивается в 2 раза и смещается в сторону города на 2 км. Осадок наблюдается на западной окраине города, охватывает практически весь город и восточный пригород (см. рис. 2, *б* и табл. 1). Плотность осадка в центре города на порядок больше плотности, полученной при штиле. Величина и распределение плотности осадка также практически не зависят от диаметра частиц примеси. При увеличении скорости ветра до 2 м/с количество примеси, выпавшей в течение суток, превышает данный показатель при штиле более чем в 2 раза (см. табл. 2).

На рис. 3 приведен пример зависимости полного количества вещества, осевшего на подстилающую поверхность $P_{\Sigma 0}$, от времени в течение суток для штилевых условий и источника на высоте 100 м. Видим, что наибольшие изменения $P_{\Sigma 0}$ происходят в дневные часы. Это соответствует наибольшей интенсивности турбулентного перемешивания, которое наблюдается в данное время суток.

В целом данные расчетов, проведенные для всего рассмотренного набора условий распространения примеси, показывают аналогичную суточную динамику

изменения количества вещества, выпадающего на подстилающую поверхность.

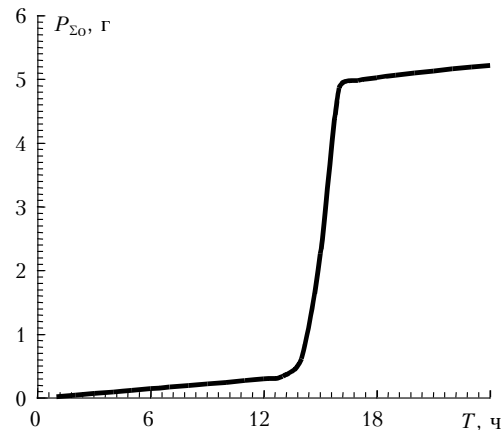


Рис. 3. Зависимость $P_{\Sigma 0}$ от времени для штилевых условий и источника на высоте 100 м

Далее рассмотрим результаты, полученные для источника, находящегося на высоте 400 м. При расположении источника в центре города и различных метеорологических условиях максимальное значение плотности осадка и суммарное количество осевшей примеси изменяются, но качественная картина такая же, как и для источника на высоте 100 м. Так, при наличии ветра максимальное значение плотности осадка уменьшается в 3 раза. При положении источника в 2 км от западной границы города максимум плотности осадка практически не изменяется при наличии ветра (см. табл. 1)

В целом при расположении источника на высоте 400 м максимальная плотность осадка в 5–6 раз меньше, чем при расположении источника на высоте 100 м, что объясняется большей турбулентностью атмосферы. Количество вещества, выпавшего в течение суток на подстилающую поверхность, с увеличением высоты источника со 100 до 400 м уменьшается примерно от 2 до 3 раз (табл. 3).

возможность обобщения расчетов на весь зимний период, а также оценки конкретных источников примеси с привлечением данных измерений и использованием методов решения «обратных» задач рассеяния атмосферных примесей [7]. В заключение авторы выражают благодарность А.С. Сафатову и Г.А. Буряк за представленные материалы наблюдений и обсуждение работы в процессе ее выполнения.

Таблица 3

Отношение $P_{\Sigma 0}$ для источника на высоте 100 м к аналогичной характеристике для источника на высоте 400 м

Диаметр частиц, мкм	Источник в центре города		Источник за городом	
	Метеорологические условия			
	штиль	ветер	штиль	ветер
2	2,97	3,75	2,14	3,09
10	1,86	3,6	1,78	3,08

Анализ результатов расчетов показывает, что при увеличении скорости ветра, если источник расположен в центре города, то максимальные значения количества осаждающейся примеси смещаются в сторону восточного пригорода, а если источник находится в 2 км от западной границы города, то эти значения смещаются в центральную часть города.

Таким образом, можно сделать вывод, что максимальные значения плотности осадка и количества выпавшей в течение суток на подстилающую поверхность примеси заметно уменьшаются с увеличением высоты расположения источника загрязнения. Метеорологические условия также оказывают существенное влияние на распространение примеси.

Выводы

В работе на модельном примере отработана методика расчетов плотности осадка на подстилающей поверхности от источников, расположенных в пределах города и его окрестностях. Проведен цикл расчетов, позволяющий оценить структуру аэрозольных отложений для типичных зимних городских метеорологических условий. Таким образом, подготовлена методическая база для изучения закономерностей накопления осадка белка и живых микроорганизмов в экспериментально полученных пробах снега. В качестве перспектив дальнейших исследований отметим

1. Андреева И.С., Бородулин А.И., Буряк Г.А., Кокочкин В.В., Олькин С.Е., Петрищенко В.А., Ратуша В.Ф., Резникова И.К., Сафатов А.С., Степанова Е.В. Оценка биогенных загрязнений в снежном покрове в окрестности Новосибирска // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 547–550.
2. Andreeva I.S., Borodulin A.I., Buryak G.A., Kokochkin V.V., Ol'kin S.E., Petrishenko V.A., Raputa V.F., Resnikova I.K., Safatov A.S., Stepanova E.A. Study of the Biogenic Part of Atmospheric Aerosols Accumulated in the Snow in the Vicinity of Novosibirsk // Digest Reports of the IVth ISTC Scientific Advisory Committee Seminar on «Basic Science in ISTC Activities». Novosibirsk, April, 2001. P. 72–73.
3. Десятков Б.М., Сарманов С.Р., Бородулин А.И. Численное моделирование структуры аэрозольных «шапок» над промышленными центрами // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 573–580.
4. Десятков Б.М., Сарманов С.Р., Бородулин А.И. Численное моделирование структуры аэрозольных «шапок» над городом от источников, находящихся вне его пределов // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12. № 7. С. 657–661.
5. Мошин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. М.: Наука, 1965. Ч. 1. 720 с.
6. Десятков Б.М., Сарманов С.Р., Бородулин А.И. Численно-аналитическая модель переноса аэрозолей в термически стратифицированном пограничном слое атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 815–820.
7. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.

O.V. Botalova, A.I. Borodulin, S.S. Kotlyarova. Estimation of density of atmospheric admixture deposits in the urban snow cover.

Model calculations of the density of atmospheric admixture deposits in the urban snow cover are performed using the semi-empirical equation of turbulent diffusion. The features of diurnal accumulation of the admixture on the underlying surface under various weather conditions and source location are discussed.