

УДК 625.7: 502.55

## СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ КАК ИНДИКАТОР СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В СИСТЕМЕ СОЦИАЛЬНО-ГИГИЕНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

© 2005 г. О.П. Негрбов, И.К. Астанин, В.С. Стародубцев, Н.Н. Астанина

*Воронежский государственный университет*

Предложена модель, по которой могут быть рассчитаны средние сезонные концентрации загрязняющих веществ от совокупности точечных источников в атмосферном воздухе на примере предприятий г. Воронежа и Новолипецкого металлургического комбината, прослежен путь распространения примесей с учетом метеорологических параметров и при помощи компьютерной программы нанесен на карту. Полученные данные могут служить для определения уровней загрязнения, определения вещественного состава и мощности выбросов предприятий, доли вещества, увлекаемого в дальний и локальный перенос.

Загрязнение атмосферы характеризуется большой пространственно-временной неоднородностью. Обусловлена она расположением источников выбросов, их мощностью, а также изменением условий погоды и режима выбросов в атмосферу. Поскольку процессы в атмосфере сложны и многообразны, а число определяющих факторов достаточно велико, наряду с организацией наблюдений за загрязнением воздуха значительное развитие получило математическое моделирование процессов распространения загрязняющих атмосферу веществ от их источников на основе теории турбулентной диффузии. Результаты моделирования широко используются для распространения примесей в атмосферу и для расчета загрязнения воздуха в городах и промышленных районах.

Российская нормативная модель расчета разовых концентраций ОНД-86 [4] предназначена для прямого расчета верхнего квантиля распределения концентраций при наиболее неблагоприятных условиях на основе негауссовой модели (полученной в результате аналитической аппроксимации численного решения уравнения атмосферной диффузии при выборе реалистичных моделей для коэффициентов этого уравнения) и не предусматривает определения актуальных концентраций.

Однако на практике существует определенный круг задач, связанных, например, с оценкой характеристик нагрузки на окружающую среду, в которых требуется производить расчет осредненных за длительный период полей концентраций. До настоящего момента в России не существует нормативной модели расчета долгопериодных концентраций. Теоретические основы для разработки модели публиковались в статьях [1, 4, 5].

Авторами предлагается модель для расчета концентраций от совокупности точечных источников, причем предполагается, что суммарное поле концентраций в расчетных точках получается в результате суперпозиции полей концентраций от отдельных источников. Модель предназначена для расчета в первую очередь сезонных концентраций, но может быть использована для определения концентраций, осредненных за другой длительный период (месяц, полугодие, год).

Расчет долгопериодных концентраций основывается на интегрировании разовой концентрации, умноженной на плотность ее распределения. В нашем случае это интегрирование заменено на интегрирование значений разовой концентрации, рассматриваемой как функция метеорологических параметров, по области их изменения с весом, равным плотности распределения указанных метеопараметров. Разовые приземные концентрации рассчитываются на основе решения уравнения атмосферной диффузии.

Исходным моментом при построении рассматриваемой модели является представление осредненной за длительный период концентрации  $c$  [4, 7]:

$$c(r, \varphi) = \int C(r, \varphi) p(C) dc, \quad (1)$$

где  $C$  — разовая концентрация (в данном случае осредненная за 20-30 мин.) в расчетной точке с полярными координатами  $(r, \varphi)$ ;  $p(C)$  — плотность вероятности разовой концентрации  $C$ , соответствующая рассматриваемому периоду времени (год, сезон, месяц); предполагается, что начало координат находится в точке расположения источника.

Для расчета приземных концентраций от совокупности точечных источников решается соответствующее уравнение атмосферной диффузии. Для этого используются изложенные выше численные

методы, процедура решения включена непосредственно в модель.

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. Под «сухим» понимается удаление примеси за счет ее взаимодействия с подстилающей поверхностью, при этом учитывается и преобразование примеси в атмосфере в результате каталитических и фотохимических реакций. Под «влажным» выпадением понимается процесс захвата облаками и осадками и осажение вместе с каплями дождя или снега на подстилающую поверхность.

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. Назовем основные причины, как практические, так и принципиальные, определившие многочисленные и весьма значительные результаты, полученные путем измерений параметров загрязнения снега. 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 воз-

духе. 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). Хорошо известно, что если задача измерения параметров загрязнения влажных выпадений решается достаточно удовлетворительно, то до сих пор не создано способов надежного определения загрязнения сухих выпадений. Разнообразные технические способы дают, как правило, несопоставимые результаты.

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

$$W = \frac{c_{\text{нп}}}{c_{\text{в}} \cdot \rho} = \frac{c_{\text{нп}} \cdot \rho}{c_{\text{в}} \cdot \rho} \quad (2)$$

где  $c_{\text{нп}}$  и  $c_{\text{в}}$  — массовая концентрация в снеге и воздухе соответственно, г/г;  $c_{\text{возд}}$  — объемная концентрация в воздухе, г/см<sup>3</sup>;  $\rho$  — плотность воздуха, г/см<sup>3</sup>.

В практике часто используют объемный коэффициент концентрирования,

$$W_0 = W / \rho \approx 775W \quad (3)$$

Таблица 1

Коэффициенты концентрирования различных элементов [8]

Элемент	W	Элемент	W
Na	2900	Cu	880
Al	620	Zn	1050
Cl	2300	As	640
Ca	<2100	Se	380
Sc	710	Br	620
V	510	Rb	640
Cr	1200	Sb	1150
Mn	760	Cs	1050
Fe	890	Ce	1400
Co	780	Pb	450
Ni	<1100	Th	920

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] (табл. 1).

Связь между загрязнением свежеснегавпавшего снега и атмосферного воздуха определяется соотношением (2). Для снежного покрова с учетом его формирования за весь зимний период необходимо учесть вклад сухих выпадений. В [2] доля сухих выпадений обозначена через  $\alpha$ ,  $\bar{n}_{ni}$  — средняя концентрация в снежном покрове, средняя концентрация в атмосферном воздухе определяется следующим образом:

$$\bar{n}_{0\bar{a}i\bar{c}i} = \frac{\bar{n}_{ni}(1-\alpha)\rho}{W} = \frac{\bar{n}_{0ni}\rho}{\bar{W}}, \quad (4)$$

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  $M/M_a = \alpha$ . Величина  $(1-\alpha)$  составляет долю массы вещества, поступающую в дальний перенос и рассеивающуюся за пределами ближнего следа. Для аэрозолей различного состава  $\alpha$  имеет свои характеристические значения. Независимо от технологических качеств источника аэрозоли пыли и летучей золы обладают максимальными значениями  $\alpha$  ( $\approx 0,4$ ). В выбросах металлургического процесса для металлов значения  $\alpha$  дифференцированы следующим образом:

0,25-0,3 для металлов группы железа (Fe, Mn, Ni, Co), 0,15-0,22 для цветных (Al, Cu, Zn, Pb), щелочных и щелочноземельных (Mg, Ca, Na) металлов. В целом, по убыванию значений  $\alpha$  элементы и соединения образуют ряд, аналогичный известному в геохимии ряду повышения подвижности элементов в гипергенных условиях [2, 3, 6].

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 Новолипецкого металлургического комбината-НЛМК (данные инвентаризации выбросов предприятий города Воронежа и НЛМК).

Расчетные и измеренные значения концентраций в точках наблюдений представлены в табл. 2 и 3.

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

Таблица 2

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

№ поста	Концентрация Fe и его соединений, мг/м <sup>3</sup>			Концентрация Mn и его соединений, мг/м <sup>3</sup>			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	Отрожка
6	2,3984	28,0274	30,2341	7,2679	27,4355	29,0203	Авиазавод
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

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

№ поста	Концентрация Fe и его соединений, мг/дм <sup>3</sup>			Концентрация Mn и его соединений, 10 <sup>-3</sup> мг/дм <sup>3</sup>			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	Водоохранилище
5	0,0108	0,26337	0,3678	0,2749	2,8133	3,5732	Отрожка
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

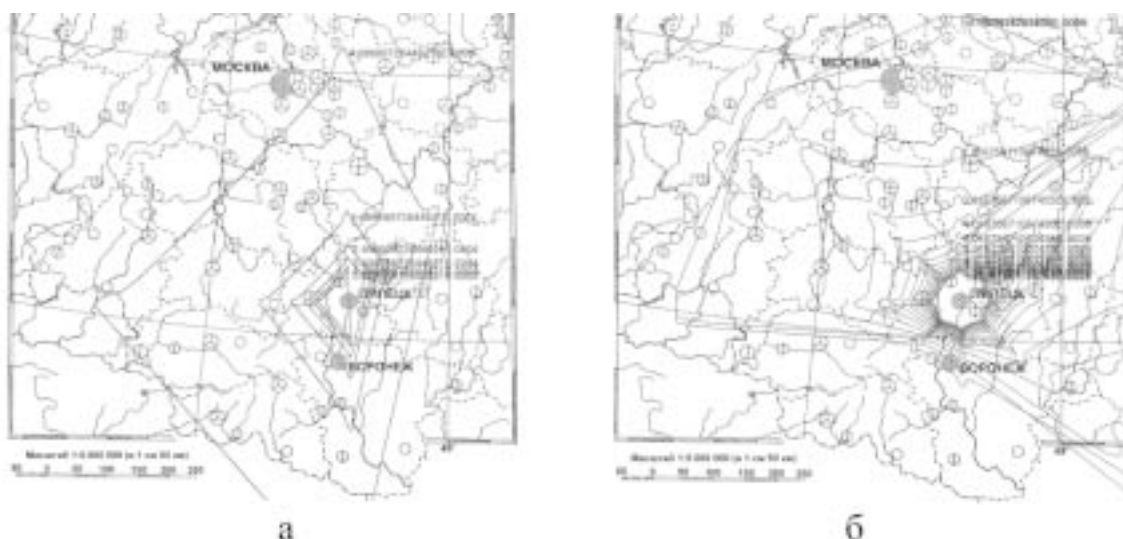


Рис. 1. Расчетные концентрации железа (а) и марганца (б) и их соединений (предприятия г. Воронежа и НЛМК)

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.

Данная модель может быть использована в оценке состояния воздушной среды в социально-гиги-

еническом мониторинге при расчетах трансграничных переносах воздушных масс службами санитарно-эпидемиологического контроля.

Выполнена при поддержке РГНФ № 05-06-56606 а/ц.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М.Е. Теоретические основы и методы расчета поля среднегодовых концентраций примесей от промышленных источников / М.Е. Берлянд, Е.Л. Генихович, С.С. Чичерин // Тр. / Гл. геофиз. обсерватория. – 1984. – Вып. 479. – С. 3-16.

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

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

4. О расчете среднегодовых концентраций примеси в атмосфере от промышленных источников / М.Е. Берлянд, Е.Л. Генихович, Я.С. Канчан и др. // Тр. / Гл. геофиз. обсерватория. – 1979. – Вып. 417. – С. 3-18.

5. Оперативная модель расчета концентраций, осредненных за длительный период / Е.Л. Генихович, М.Е. Берлянд, И.Г. Грачева и др. // Тр. / Гл. геофиз. обсерватория. – 1998. – Вып. 549. – С. 11-31.

6. *Сауков А.А.* Геохимия / А.А. Сауков. – М.: Госгеолиздат, 1961. – 379 с.

7. *Calder K.L.* Multiple-source plume models of urban air pollution – their general structure // Atmospheric Environment. 1977. V. 11. P 403-414.

8. *Peirson D. H. e. a.* Trace elements in the atmospheric environment. — Nature, 1973, vol. 241, N 5387, p. 252-256

9. *Scott B. C.* Sulfate washout ratios in winter storms.— J. Appl. Meteorol., 1981, vol. 20, p. 619-625.