

**АНАЛИЗ ПЕРЕНОСА КРУПНО И МЕЛКО-ДИСПЕРСНЫХ
АЭРОЗОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ**

И. К. Астанин*, Н. Н. Астанина**

**Воронежский государственный университет,
**Российский государственный социальный университет*

В статье дан анализ времени нахождения и дальности переноса частиц тяжелых металлов в атмосфере в зависимости от их размера. Оценен механизм попадания примеси в нижнюю часть тропосферы и определен метод расчета расстояния переноса от источника загрязнения. Авторами проведены эксперименты по определению наличия этой примеси в свежеснеге и показано соответствие атмосферного содержания количеств этих веществ по коэффициенту концентрирования.

Вследствие интенсивного развития промышленности, транспорта и роста выбросов загрязняющих веществ в атмосферу значительно расширилась зона распространения атмосферных примесей. В результате уже в настоящее время сложились и постепенно увеличиваются глобальные и региональные уровни фонового загрязнения техногенного происхождения.

Характерная высота поступления загрязняющих веществ (ЗВ) от промышленных предприятий и тепловых электростанций составляет 150 м. Эта оценка учитывает высоту труб, начальный подъем газопылевого факела [1], распределение мощности выброса по отдельным типам источников. Реальная высота выброса может колебаться в широких пределах, от десятков до сотен метров.

Среднее время пребывания в атмосфере техногенных и природных веществ тесно связано с высотой первоначального выброса и физико-химическими свойствами. Время пребывания, как правило, растет с высотой выброса и увеличением дисперсности аэрозольных частиц, представляющих собой взвешенные твердые коллоидные и жидкие частицы в газообразной среде размером от нескольких микрометров до их сотых и тысячных долей. В приземном слое атмосферы концентрация аэрозолей максимальна над промышленными регионами. Геохимической сущностью аэрозолей является их способность конденсировать на своей поверхности рассеянные химические элементы. Содержа-

ние некоторых из них выше, чем в почвах и приповерхностной литосфере.

Содержание тяжелых металлов, которые находятся в атмосфере в основном в парогазовом состоянии, колеблется в широком диапазоне и зависит от характера подстилающей поверхности и метеорологических условий в момент измерения. Летучесть этих микроэлементов обусловлена тем, что они связаны в атмосфере с субмикронными частицами, которые в воздухе ведут себя практически как газ.

Для оценки степени аккумуляции элементов в аэрозолях В. В. Добровольским предложен коэффициент аэрозольной концентрации

$$K_a = \frac{A}{K}, \quad (1)$$

где A — содержание в твердой фазе аэрозоля; K — кларк элемента в «гранитном» слое литосферы.

Оказалось, что аэрозоли обогащены многими металлами, прежде всего кадмием ($K_a > 100$), свинцом, оловом (50—100), цинком, медью, никелем, хромом (10—50), ванадием (до 10), т.е. элементами, для которых большая часть поступления в атмосферу связана с выбросами промышленных предприятий. Это указывает на преимущественно техногенное происхождение обогащенности аэрозолей тяжелыми металлами. Литофильные элементы (титан, алюминий, цирконий и др.) не накапливаются в аэрозолях. Железо, марганец, медь, цинк, хром больше связаны с крупно-мелко-дисперсным аэрозолем; мышьяк, сурьма, свинец, кадмий, никель концентрируются в субмикронной фазе [2].

Частицы, представляющие в атмосфере, например, Fe, Mn, H₂SO₄ и MeSO₄, весьма малы по размеру [3] (табл. 1):

Таблица 1

Размеры частиц

Вещество	r_m , мкм
Mn	0,88±0,30
Fe	0,7±0,2
Сульфаты	0,2—0,5

Оценка [4] времени жизни аэрозоля субмикронного диапазона свидетельствует о том, что частицы размером менее 0,01 мкм находятся в воздухе не более 1 сут., а частицы, радиус которых не превышает 0,1 мкм, примерно 80 сут.

Время пребывания мелкодисперсных аэрозолей в нижней тропосфере, включая сульфаты и нитраты, составляет несколько суток, обычно не более пяти [5]. Крупные частицы могут находиться в нижней тропосфере в основном несколько десятков минут. Время пребывания мелкодисперсных аэрозолей в верхней тропосфере до 10—20 дней, а в стратосфере более года.

Мелкодисперсные аэрозоли (размером до 200 мкм) удаляются из атмосферы главным образом в результате вымывания их осадками (до 80 % общего количества) и непосредственного осаждения на землю (примерно 20 %). Соотношение между «сухим» и «влажным» осаждениями существенно изменяется в зависимости от физико-географических условий местности.

Для локальных выпадений характерно сухое и во многих случаях влажное осаждение из подоблачного слоя веществ, имеющих малое время пребывания в атмосфере, процессы вымывания в облаке не имеют существенного значения. В случае регионального загрязнения главную роль играет влажное вымывание из подоблачного слоя, вклад внутриоблачного вымывания обычно растет с удалением от источника, сухое выпадение имеет подчиненное значение.

В зимний период снежный покров как естественный планшет-накопитель дает действительную величину сухих и влажных выпадений в холодный сезон. 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-хими-

ческие свойства загрязняющих веществ, размер аэрозолей.

Отбор проб снежного покрова подразумевает послыйный отбор, позволяющий получить динамику загрязнения за зимний сезон, и 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. Таким образом, снежный покров позволяет решить проблему количественного определения суммарных параметров загрязнения (сухих и влажных выпадений).

Связь между загрязнением свежеснежившего снега и атмосферного воздуха определяется через коэффициент концентрирования W [6]

$$W = \frac{c_{\text{сн}}}{c_{\text{возд}}} = \frac{c_{\text{сн}}\rho}{c_{0\text{возд}}}, \quad (2)$$

где $c_{\text{сн}}$ и $c_{\text{возд}}$ — массовая концентрация в снеге и воздухе соответственно, г/г; $c_{0\text{возд}}$ — объемная концентрация в воздухе, г/см³; ρ — плотность воздуха, г/см³.

Для снежного покрова с учетом его формирования за весь зимний период необходимо учесть вклад сухих выпадений. Согласно [7] средняя концентрация ЗВ в снеге $\bar{c}_{\text{сн}}$ определяется следующим образом:

$$\bar{c}_{\text{сн}} = \frac{\bar{c}_{0\text{возд}}W}{(1-\alpha)\rho} = \frac{\bar{c}_{0\text{возд}}\bar{W}}{\rho}, \quad (3)$$

где α — доля сухих выпадений, $\bar{W} = \frac{W}{1-\alpha}$ — 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 ЗВ в снежном покрове (M) и выбросами ($M_{\text{в}}$) 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. Для металлов подгруппы железа (Fe, Mn, Ni, Co), значения α равны 0,25—0,3 [7].

В снеге концентрация $c_{\text{сн}}$ ЗВ выражается в мг/дм³ или в мг/м², мкг/см². Величина, определяемая в мг/м², мкг/см², обозначается через Q , именуется поверхностной плотностью загрязнения, запасом ЗВ в снеге, и связываются с концентрацией $c_{\text{сн}}$ следующим образом [8]:

$$Q = kc_{\text{сн}}p, \quad (4)$$

p — влагозапас в снеге, мм, г/см³; k — коэффициент, согласующий единицы измерения.

Закономерность распределения концентраций загрязняющих веществ в поперечных сечениях следа близка к нормальному закону. Вдоль оси следа убывание концентраций от источника аппроксимируется экспоненциальной функцией [7]:

$$c = c_0 e^{-\lambda x}, \quad (5)$$

где c_0 — максимальная концентрация ЗВ на расстоянии $x_0 \approx 2$ км от источника, мг/дм³; λ — коэффициент, характеризующий скорость изменения концентрации ЗВ. Экспериментально получено, что для железа, марганца и их соединений $\lambda = 0,03$ км⁻¹ [7]

Предельное расстояние $x_{\text{пр}}$, на котором еще можно выявить аномальное превышения над уровнем регионального фона района определяется из соотношения [9]:

$$x_{\text{пр}} = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{c_0}{3c_{\text{ф}}}. \quad (6)$$

Все эти закономерности были учтены в применяемой методике расчета [10], предложенной авторами. Эта методика позволяет оценить локальное атмосферное загрязнение с учетом региональных составляющих, а также проанализировать химический состав компонентов.

За последние годы наблюдается накопление соединений железа и марганца в гидросфере г. Воронежа. Природа, источники, влияющие на создание зон повышенных концентраций соединений железа и марганца в водоносном горизонте и в воде водозаборных скважин г. Воронежа не установлены. Предполагается привнос этих веществ с верховий р. Воронеж из промышленных районов г. Липецка. Другим источником называют природную геологическую среду.

Для проверки гипотезы воздушного переноса данных компонентов ЗВ авторами в течение 1997—2005 гг. осуществлялся расчетный и натурный мониторинг переноса, рассеяния и осаждения соединений железа и марганца на территорию г. Воронежа. Авторами был разработан алгоритм моделирования атмосферного массопереноса загрязняющих компонентов природной среды, осуществляющий процессы выброса, рассеяния и осаждения ЗВ.

Он состоит из следующих блоков:

Блок А (процесс выброса ЗВ)

— Расчет комплексной комбинации параметров выбросов.

— Расчет максимальной разовой приземной концентрации ЗВ в воздухе при неблагоприятных метеоусловиях.

— Расчет вспомогательного коэффициента d_0 для определения расстояния x_m от источника, где достигается c_m .

— Расчет расстояния x_m от источника, на котором достигается c_m .

Блок В (процесс рассеяния ЗВ)

— Расчет максимальной приземной концентрации ЗВ в воздухе $c_{\text{ми}}$ при скорости ветра $u \neq u_m$.

— Расчет максимального расстояния $x_{\text{ми}}$ от источника выброса, на котором достигается $c_{\text{ми}}$ при скорости ветра $u \neq u_m$.

— Расчет наибольшей концентрации c на расстоянии $x > x_m$ при опасной скорости ветра u_m .

— Расчет наибольшей концентрации c_u на расстоянии $x > x_m$ при скорости ветра $u \neq u_m$.

— Расчет наибольшей концентрации c_y по оси y на расстоянии x .

— Расчет сезонной концентрации ЗВ c_d в атмосферном воздухе за период времени τ_d на расстоянии x от источника выброса.

Блок С (процесс сухого и мокрого осаждения ЗВ)

— Расчет концентрации $c_{\text{сн}}$ в снежном покрове за зимний период.

— Расчет предельного распространения ЗВ в снеге x .

— Графический вывод результатов расчета.

Программный комплекс моделирования атмосферного массопереноса загрязняющих компонентов природной среды включает в себя базу данных ATM_W и программный комплекс «ЭКО».

База данных ATM_W состоит из двух основных ветвей: данные для моделирования атмосферного массопереноса загрязняющих компонентов и данные химического анализа проб атмосферного воздуха и снега по намеченным точкам отбора.

Программный комплекс «ЭКО» состоит из программного модуля PARAMETR, формирующего данные по метеорологическим условиям и параметрам выброса ЗВ из ATM_W, программы моделирования процессов выброса и рассеива-

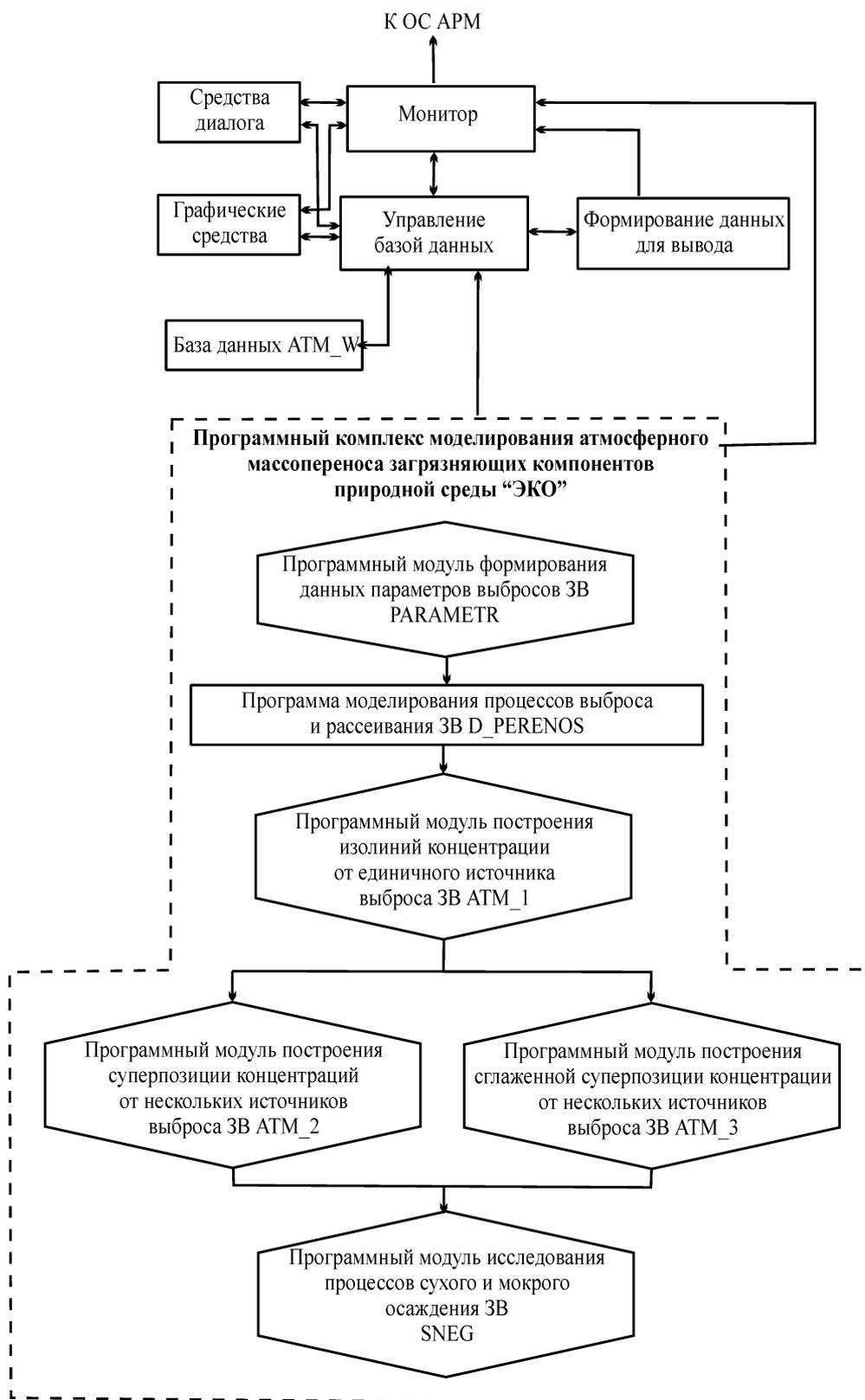


Рис. 1. Структура программного комплекса моделирования атмосферного массопереноса загрязняющих компонентов природной среды в системе крупного промышленного центра

ния ЗВ по оси факела источника D_PERENOS и программных модулей: АТМ_1, осуществляющего построение изолиний концентраций ЗВ от выброса единичного источника с предварительным выбором карты определённого масштаба; АТМ_2, строящего точную суперпозицию изолиний концентраций ЗВ на карте от выброса нескольких источников как в локальном так и в региональном масштабе и АТМ_3, осуществляющего построение сглаженной суперпозиции изолиний концентраций ЗВ от выброса нескольких источников как в локальном так и региональном масштабе. Данные, полученные в результате работы программных модулей АТМ_2 и АТМ_3, передаются в программный модуль SNEG для проведения исследований по процессам сухого и мокрого осаждения ЗВ.

Перед началом расчета был сделан анализ предприятий, которые могут быть источниками загрязнения. Воронежская область граничит с Белгородской, Курской, Липецкой и Тамбовской областями, где находятся такие промышленные гиганты как Лебединский горнообогатительный комбинат (Белгородская обл.), Михайловский горнообогатительный комбинат (Курская обл.), Новолипецкий металлургический комбинат (НЛМК) (Липецкая обл.). Анализ метеорологических данных, состава и мощности выбросов промышленных предприятий Центрального Черноземья показывает, что наиболее возможным приоритетным загрязнителем территории г. Воронежа соединениями железа и марганца с учетом размера частиц можно рассматривать Новолипецкий металлургический комбинат (Липецкая обл.).

Как показали результаты мониторинга снега вокруг промышленных предприятий на снежном покрове устанавливаются ореолы аномальных (превышающих фоновую концентрацию в 2–4 раза) концентраций веществ, которые входят в состав выброса или составляют продукты трансформации этих веществ. Площадь аномальных полей концентраций таких ореолов, и заключенная в них масса загрязняющих веществ, закономерно связаны с величиной выброса и длительностью периода накопления. Конфигурация аномального поля обуславливается распределением загрязняющих веществ на рассматриваемой площади, определяется повторяемостью направлений ветра и расстоянием от источника. Аномальные поля на следе, обусловленные главным векто-

ром переноса, прослеживаются на десятки километров.

В вертикальном разрезе снежного покрова распределение концентраций загрязняющих веществ неравномерно и носит стратифицированный характер: резко обогащенные слои снега чередуются со слоями почти фонового уровня содержаний. Такая стратификация обусловлена переменами направлений переноса и довольно устойчиво сохраняется в снежном покрове в течение всего зимнего периода. Так, например, в ненарушенном покрове под факелом НЛМК на расстоянии 1 и 5 км от источника, в разрезе снега визуально выделялось от 8 до 12 четко выраженных слоев снега с различной интенсивностью загрязнения. На участке, где задерживается и накапливается снег, стратификация выражена менее четко. В эродированном снежном покрове наблюдаются пониженные содержания загрязняющих веществ.

Площадь зон загрязнения, ограниченная изолинией запаса ЗВ, превышающего фоновые значения в два-три раза, колеблется в интервале 180–1500 км² для железа и его соединений, 1500 км² — для марганца и его соединений.

С удалением от источника в шлейфе происходит фракционирование аэрозольных частиц. В непосредственной близости от промышленных предприятий выпадают крупные частицы, оседающие на фильтр при фильтровании пробы. Так, например, для железа и марганца и их соединений отношение концентраций в фильтрате к концентрациям на фильтре K на расстоянии от НЛМК $x = 2$ км составляет около 3 %. На больших расстояниях от НЛМК концентрации в фильтрате остаются практически неизменными, а концентрации на фильтре уменьшаются. При этом для $x = 50$ км значение K составляет для железа и марганца ≈ 10 % (табл. 2).

Вторичное рассеяние выпадающих на снег веществ в связи с перевеванием снега сравнительно невелико: отношение поперечного рассеяния примесей в снеге к тому же параметру в факеле оценивается значением 1,5–2,0.

От НЛМК (г. Липецк) в направлении г. Воронежа аномальные концентрации железа ($9,7584 \times 10^{-3}$ мг/дм³), марганца ($4,9316 \times 10^{-4}$ мг/дм³) и их соединений (в 2–4 раза выше фоновых значений) наблюдались в среднем на расстоянии ($x_{\text{пр}}$) 100 км и более для марганца и его соединений, 150 км и более для железа и его соединений (рис. 2).

Запас металлов в фильтрате $Q_{\text{ф}}$ ($10^{-9}\text{г}/\text{см}^2$) и осадке талой воды в снеге $Q_{\text{ос}}$ ($10^{-9}\text{г}/\text{см}^2$), их отношение K (%) на различных расстояниях от НЛМК

Вещество	$x = 2 \text{ км}$			$x = 50 \text{ км}$		
	$Q_{\text{ф}}$	$Q_{\text{ос}}$	K	$Q_{\text{ф}}$	$Q_{\text{ос}}$	K
Fe	896	58067	1,6	117	1439	8,5
Mn	47	2831	1,8	44	419	12,5

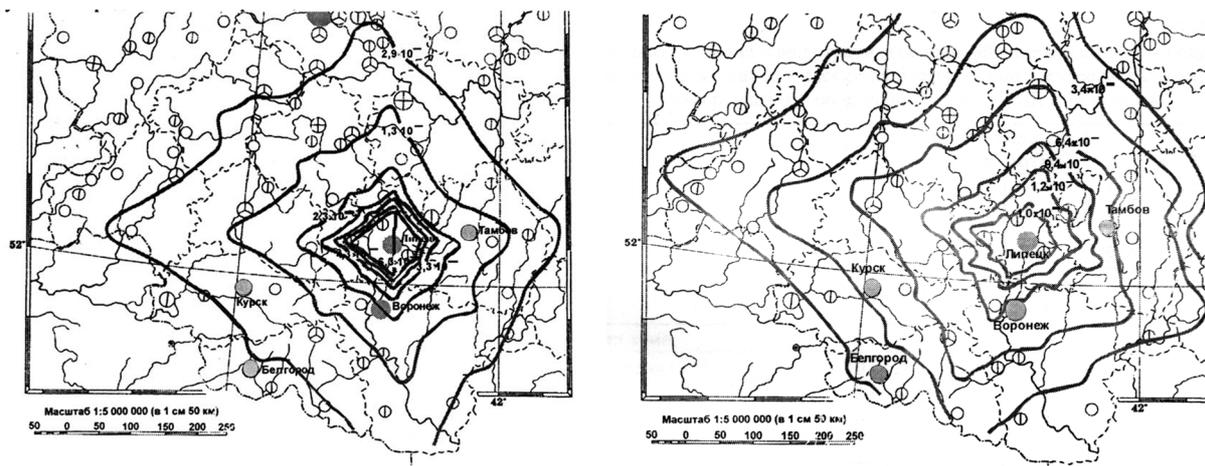


Рис. 2. Результаты расчета локальной и региональной составляющих концентраций железа (слева) и марганца (справа)

Проанализировав полученные данные можно сделать следующие выводы:

1. Распространение крупно и мелко-дисперсных аэрозолей в атмосфере может быть рассчитано в соответствии с предлагаемой математической моделью с учетом метеорологических параметров исследуемой территории.

2. В основном, крупно и мелко-дисперсные аэрозоли являются загрязняющими компонентами атмосферы на региональном уровне.

3. Источником постоянного нарастания содержания соединений железа и марганца в гидросфере города Воронежа может являться НЛМК (г. Липецк)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. — Л.: Гидрометеоздат, 1975. — 448 с.

2. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. — Л.: Гидрометеоздат, 1979, — 375 с.

3. Meyers J.L., Duce S.A. Gaseous and particulate bromine in the marine atmosphere. — J. Geophys. Res., 1972, V. 77, № 27, P. 5330—5338.

4. Jaenicke R., Junge C. Studien zur oberen Grunzgrösse des natürlichen Aerosols. — Beitr. Phys. Atm., 1967, Bd 40, S. 129—143.

5. Кислотные дожди / Ю. А. Израэль, И. М. Назаров, А. Я. Прессман и др. — Л.: Гидрометеоздат, 1983. — 206 с.

6. Василенко В.Н. Мониторинг загрязнения снежного покрова / В. Н. Василенко, И. М. Назаров, Ш. Д. Фридман. — Л.: Гидрометеоздат, 1985. — 185 с.

7. Scott B.C. Sulfate washout ratios in winter storms. — J. Appl. Meteorol., 1981, vol. 20, P. 619—625

8. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы / Х. Юнге. — М.: Мир, 1965. — 425 с.

9. Василенко В.Н. Оценка загрязнения снежного покрова промышленных районов по спутниковым изображениям / В. Н. Василенко, В. Г. Прокачева, Ш. Д. Фридман // Тр. Ин-т географии РАН. — 1981. — Вып. 285. — С. 56—63.

10. Астанин И.К. Расчет рассеивания промышленных выбросов загрязняющих веществ в атмосфере / И. К. Астанин, Н. Н. Астанина // Вестник ВГУ, Серия: География, Геоэкология. — 2006. — № 1. — С. 47—52.