

УДК 551.511.42.001.572(571.14)

Численный анализ данных аэрозольных выпадений примесей от высотного источника

В.Ф. Рапута¹, В.А. Шлычков², А.А. Леженин¹,
А.Н. Романов², Т.В. Ярославцева^{1*}

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6

²Институт водных и экологических проблем СО РАН
630090, г. Новосибирск, Морской пр., 2

Поступила в редакцию 20.01.2014 г.

На основе решений уравнения переноса тяжелой неоднородной примеси предложена модель реконструкции полей ее выпадения от непрерывного высотного источника. Проведена апробация модели на данных полевых и химико-аналитических исследований загрязнения снежного покрова бенз(а)пиреном в окрестностях ТЭЦ-3 г. Барнаула. Рассмотрено влияние эффектов поворота ветра в пограничном слое атмосферы на формирование поля длительных выпадений аэрозольной примеси.

Ключевые слова: примесь, загрязнение снежного покрова, аэрозоль, бенз(а)пирен, численное моделирование, реконструкция, пограничный слой атмосферы; substance, pollution snow cover, aerosol, benzoperin, numerical modeling, reconstruction, atmospheric boundary layer.

Введение

При проектировании размещения и режимов эксплуатации дымовых труб, достигающих высот нескольких сот метров над поверхностью земли, требуется более детальный учет вертикальной структуры поля ветра [1–5]. Это связано с необходимостью адекватного описания атмосферного переноса при изменении вектора скорости с высотой. В пределах атмосферного пограничного слоя (АПС) ветровые характеристики могут сильно отличаться от простого плоскопараллельного распределения, поэтому использование в моделировании одних лишь приземных значений скорости ветра для расчета полей загрязнения может оказаться некорректным [6–8].

Наличие сил Кориолиса обуславливает правый поворот ветра с высотой. Угол поворота зависит от многих факторов, а его теоретическое значение составляет около 30°. Особый интерес представляет учет этих эффектов при изучении миграции дымового аэрозоля, выбрасываемого высотным источником. При эмиссии горячих газов из высоких труб происходит их дополнительный подъем относительно источника за счет сил плавучести и динамического импульса. Чем больше высота выброса и выше температура смеси, тем значительнее проявляется эффект поворота скорости ветра.

Тяжелые частицы, попав в атмосферный поток, наряду с горизонтальным дрейфом испытывают смещение по вертикали и меняют направление переноса в соответствии с локальным направлением вектора скорости. Это обуславливает сложную трехмерную структуру траекторий седиментирующей примеси и своеобразие следа выпадений, которое выражается в существенном различии между осью следа и ориентацией преобладающего направления приземного ветра. Заметим, что у низкорасположенных источников эмиссии, где поворот ветра не играет серьезной роли, обычно выдерживается высокая корреляция между директрисой основного переноса и осью шлейфа.

Изложенный механизм формирования поля выпадений от высотных источников крайне важен при описании процессов длительного (сезонного) загрязнения территорий от производственных труб [9, 10]. Применение прямых методов математического моделирования переноса аэрозольных примесей в атмосфере от высотных источников сталкивается со значительными трудностями. Так, существует неопределенность в задании характеристик дисперсного состава выбрасываемых веществ, мощности источника, режима его работы [11–14]. Необходима также детальная информация об актуальных гидрометеорологических условиях. Эти обстоятельства приводят к необходимости развития мониторинговых исследований, которые основаны на компромиссном подходе, базирующемся на постановках обратных задач оценивания параметров источников и полей аэрозольных выпадений примесей [15].

* Владимир Федотович Рапута (raputa@sscc.ru); Вячеслав Александрович Шлычков (slav@ad-sbras.nsc.ru); Анатолий Александрович Леженин (lezhenin@ommfao.sccc.ru); Андрей Николаевич Романов (ran@iwer.ru); Татьяна Владимировна Ярославцева (raputa@sscc.ru).

1. Экспериментальные исследования

Таблица 1

Практически важным объектом исследования являются аэрозольные выбросы ТЭЦ-3 г. Барнаула. Основной выброс отходящей газоаэрозольной смеси производится через трубу высотой 230 м. Отбор проб снега в окрестностях ТЭЦ-3 выполнялся в марте 2010 г. по двум радиальным маршрутам, ориентированным на северо-восточное и восточное направления от источника примеси. Для характеристики ветрового режима в пограничном слое атмосферы для зимнего периода использовались климатические данные с аэрологической станции г. Новосибирска (табл. 1) [16]. Учитывая высоту трубы и повторяемость направлений ветра, преобладающие выпадения аэрозольных примесей в зимнее время следует ожидать в северо-восточном и восточном направлениях.

На рис. 1 представлена схема маршрутного отбора проб снега. Точки пробоотбора на маршрутах размещались с определенным сгущением в окрестностях трубы, а также с учетом предварительной информации о возможных дополнительных источниках выброса бенз(а)пирена (БП), условиях местности, системе дорог, размещении застройки и лесных насаждений, состоянии снежного покрова и т.д.

Климатическая повторяемость (%) направлений ветра на разных высотах в зимнее время

Направление ветра	Высота			
	Флюгер	100 м	200 м	500 м
С	5	3	3	4
СВ	9	6	6	7
В	9	9	9	8
ЮВ	17	8	6	8
Ю	27	25	17	10
ЮЗ	23	32	36	29
З	8	13	18	28
СЗ	2	3	5	8

Результаты экспедиционных и химико-аналитических исследований содержания БП в снеговых пробах приведены в табл. 2. Предварительный анализ данных наблюдений, представленных в табл. 2, показал, что наиболее значительные выпадения БП на снеговой покров происходят в ближней зоне (до 2–3 км). Принимая во внимание значительную высоту источника, можно заключить, что основные выпадения БП в этой зоне возможны лишь в составе крупных фракций частиц.

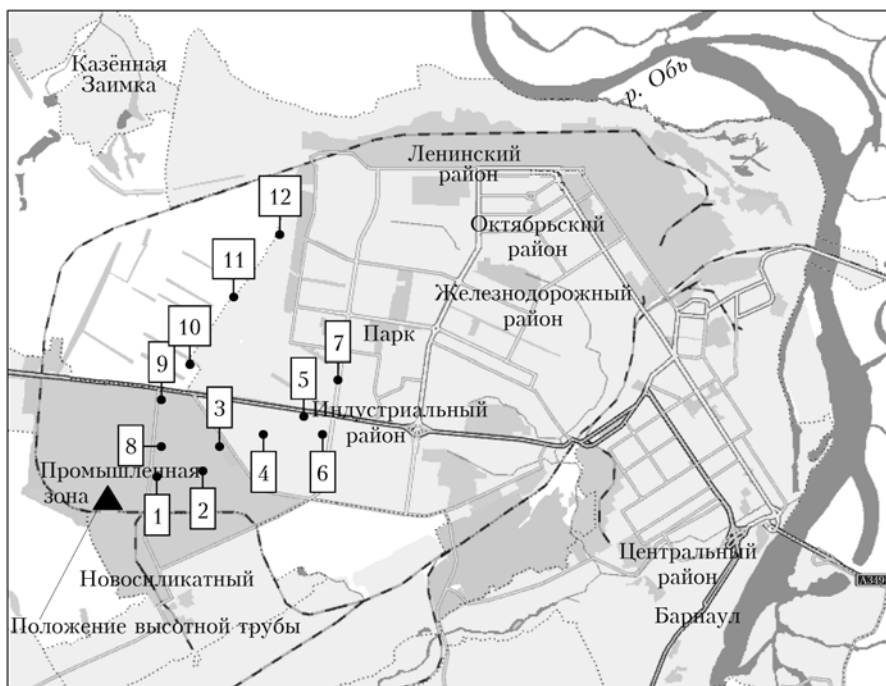


Рис. 1. Схема маршрутных отборов проб снега в окрестности ТЭЦ-3

Таблица 2

Измеренные концентрации бенз(а)пирена (нг/кг) в снеговых пробах к востоку и северо-востоку от трубы ТЭЦ-3

Характеристика	Направление пробоотбора											
	восточное						северо-восточное					
	Номер точки											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Расстояние, км	0,7	1,6	1,9	2,8	3,2	3,5	4	0,9	1,5	2,4	4,0	5,5
Концентрация, нг/кг	114,2	84,2	97,4	28,1	41,4	34,5	9	73,7	54,5	22,7	16,4	14,7

2. Реконструкция полей аэрозольных выпадений

Из предварительного анализа данных наблюдений вытекает, что при построении моделей оценивания поля выпадений БП вполне применима кинематическая схема распространения частиц в атмосфере. В этом случае движение частиц в поле ветра представляет собой падение с постоянной стоксовой скоростью и перенос примеси можно описать следующим уравнением:

$$u \frac{\partial q}{\partial r} - w \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

с граничным условием

$$q|_{r=0} = \psi(z) \equiv Q\delta(z-H), \quad (2)$$

где $q(r, z)$ – концентрация примеси в плоскости (r, z) ; u – средняя горизонтальная скорость ветра в направлении оси r ; w – скорость оседания частиц по оси z ; ось z направлена вертикально вверх; Q , H – мощность и эффективная высота источника; δ – дельта-функция Дирака.

Перенос примеси происходит по характеристикам уравнения (1), и решение задачи (1), (2) представляется в виде [17]:

$$q(r, z) = \psi\left(z + \frac{w}{u}r\right). \quad (3)$$

Описание спектра размеров частиц $N(w)$ полидисперсной примеси в источнике по скоростям оседания проводилось с использованием следующей двухпараметрической функции [14]:

$$N(w) = \frac{n^{n+1}}{w_k \Gamma(n+1)} \left[\frac{w}{w_k} \exp\left(-\frac{w}{w_k}\right) \right]^n. \quad (4)$$

Тогда с использованием (3), (4) и свойств дельта-функции плотность выпадений примеси в радиальном от источника направлении представляется в виде

$$\begin{aligned} \sigma(r, \theta) &= \int_0^\infty w q|_{z=0} N(w) dw = \int_0^\infty Q w \frac{u}{r} \delta\left(w - \frac{Hu}{r}\right) N(w) dw = \\ &= \frac{QH u^2}{r^2} N\left(\frac{Hu}{r}\right) = \theta_1 r^{-\theta_2} \exp\left(-\frac{\theta_3}{r}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\theta_1 = \frac{Qu}{\Gamma(n+1)} \left(\frac{nHu}{w_k}\right)^{n+1}, \quad \theta_2 = n+2, \quad \theta_3 = \frac{nHu}{w_k}.$$

Поле плотности выпадений тяжелой неоднородной примеси в окрестности источника описывается соотношением

$$\Pi(r, \varphi, \theta) = \sigma(r, \theta) P(\varphi + 180^\circ). \quad (6)$$

Здесь $P(\varphi)$ – осредненная в слое оседания повторяемость направлений ветра. Оценку неизвестного вектора параметров θ в выражении (5) можно провести по данным наблюдений поперностной концентрации осадка методом наименьших квадратов.

С использованием данных экспериментальных исследований выпадений БП в окрестностях ТЭЦ-3 г. Барнаула была проведена апробация модели оценивания (5). По весьма ограниченному набору точек измерений численно реконструированы выпадения БП в рассматриваемых направлениях. Результаты численного восстановления полей выпадений БП на маршрутах пробоотбора представлены на рис. 2.

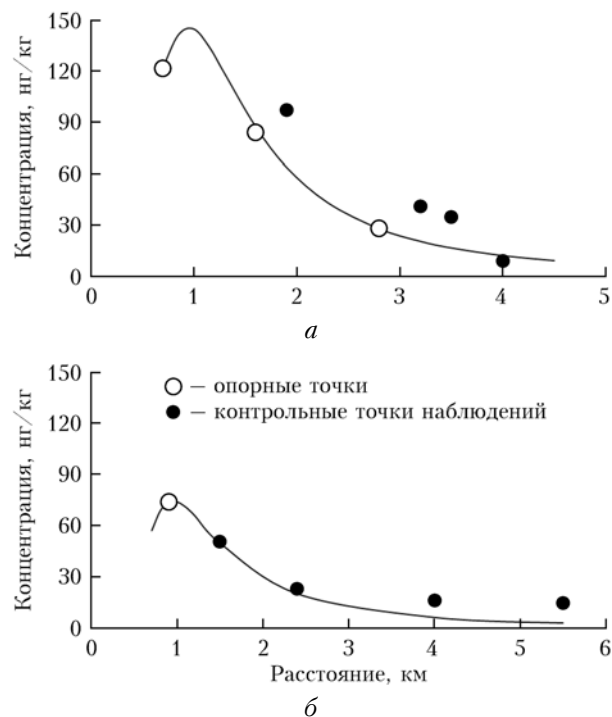


Рис. 2. Восстановленные концентрации бенз(а)пирена (нг/кг) в снегу на основе модели (5) в восточном (а) и северо-восточном (б) направлениях от трубы ТЭЦ-3 г. Барнаула

Для оценивания поля выпадений в восточном направлении были использованы данные измерений БП лишь в точках 1, 2, 4 (опорные точки). При восстановлении поля в северо-восточном направлении оценки параметров θ_2 , θ_3 были взяты из предыдущего расчета. В этом случае для восстановления зависимости использовалась одна опорная точка наблюдения – точка 8. Следует отметить, что плотность выпадений БП в северо-восточном направлении вдвое ниже выпадений в направлении на восток и вполне согласуется с отношением зимней повторяемости южных и юго-западных ветров на высоте 200 м (см. табл. 1).

На рис. 3 приведено восстановленное поле концентрации БП в снегу с использованием зависимости (6), зимней розы ветров на высоте 200 м и опорных точек 1, 2 и 4.

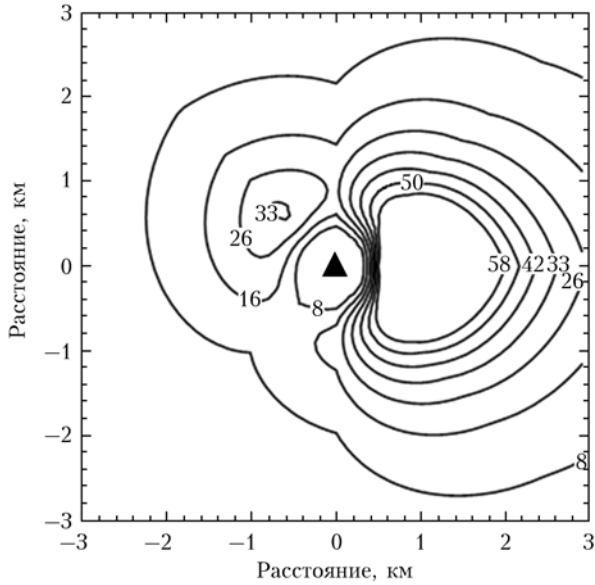


Рис. 3. Восстановленное поле концентрации бенз(а)пирена (нг/кг) в снеге за зимний сезон 2009/10 г.

Видно, что максимум выпадений БП находится восточнее трубы на расстоянии около 1 км и основной снос примеси происходит в восточном направлении.

3. Вертикальная структура поля ветра в пограничном слое атмосферы

Введем декартову систему координат, в которой ось x направлена по горизонтали параллельно вектору геострофической скорости, ось y — по нормали к ней, а ось z — вертикально вверх. Начало координат совместим с подстилающей поверхностью. Для описания полей скорости воспользуемся уравнениями Экмана для АПС [2], аппроксимируемыми балансом сил Кориолиса, барического градиента и турбулентной вязкости:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = lv + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -l(u - u_g) + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial v}{\partial z},$$

где t — время; u, v — компоненты скорости вдоль осей x, y ; u_g — геострофическая скорость; l — параметр Кориолиса; K — коэффициент вертикального турбулентного обмена.

Зададим краевые условия для уравнений (7). На нижней границе области предполагается сопряжение решения с профилями скоростей приземного слоя толщиной h :

$$K \frac{\partial u}{\partial z} = c_u |\mathbf{u}| u, \quad K \frac{\partial v}{\partial z} = c_u |\mathbf{u}| v \quad \text{при } z = h. \quad (8)$$

Здесь $|\mathbf{u}|$ — модуль скорости; c_u — коэффициент сопротивления, рассчитываемый по модели квазистационарного подслоя [18]. На верхней границе

$z = H$ примем условие затухания возмущений пограничного слоя

$$u = u_g, \quad v = 0 \quad \text{при } z = H. \quad (9)$$

Описание вертикального турбулентного обмена основано на применении двухпараметрической модели для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации [19] в реализации [20]. В модели турбулентности считается, что АПС стратифицирован устойчиво со стандартным значением статической устойчивости.

Система (7) с граничными условиями (8), (9) и уравнениями турбулентного замыкания решалась методом конечных разностей с использованием неравномерной по z сетки, в которой шаги изменялись от значения $\Delta z = 2$ м у нижней границы до $\Delta z = 6$ м при $z = H$. Применялась неявная численная схема с матричными прогонками, интегрирование велось до выхода решения на установление.

Стационарные профили u, v при геострофическом ветре $u_g = 5$ м/с представлены на рис. 4 (кривые 1, 2). Высота АПС, на которой расчетные скорости выходят на значения скоростей в свободной атмосфере, определялась по уровню затухания коэффициента турбулентности K , вычисляемого в рамках двухпараметрической модели турбулентного замыкания. Согласно рис. 4 при заданных условиях стратификации и динамического режима высота пограничного слоя равна 1400 м. Поперечная составляющая скорости начинает сказываться ниже уровня $z = 1000$ м (кривая 2 на рис. 4), а максимум v достигается на высоте 250 м.

Кривая 3 на рис. 4 построена по кривым 1, 2 и изображает спираль Экмана в плоскости годографа (u, v) . Точки на кривой указывают на высоты z , отвечающие текущему направлению ветра. Отчетливо просматривается упомянутый выше поворот скорости.

Для получения оценки степени деформации следа за счет вариаций скорости по высоте проведем траекторный анализ пути тяжелой частицы, вылетевшей из трубы на уровне 230 м. Будем исходить из уравнений

$$\frac{dx_c}{dt} = u, \quad \frac{dy_c}{dt} = v, \quad \frac{dz_c}{dt} = w - w_g, \quad (10)$$

где x_c, y_c, z_c — актуальные координаты частицы; w — собственная скорость подъема горячего аэрозоля; w_g — гравитационная скорость оседания. Полагая, что в начальный момент частица имела координаты $x_c = 0, y_c = 0, z_c = 230$ м, и подставляя в (10) расчетные скорости u, v , проинтегрируем систему (10) до момента достижения частицей уровня подстилающей поверхности, т.е. когда $z_c = 0$. Рассмотрим грубодисперсный аэрозоль с $w_g = 0,5$ м/с. Расчет показывает, что частица выпадет примерно через 11 мин, преодолев расстояние 2100 м от точки эмиссии. Поперечное смещение от линии геострофического потока составило 730 м. Последняя величина отражает влияние поворота ветра на высотах и является

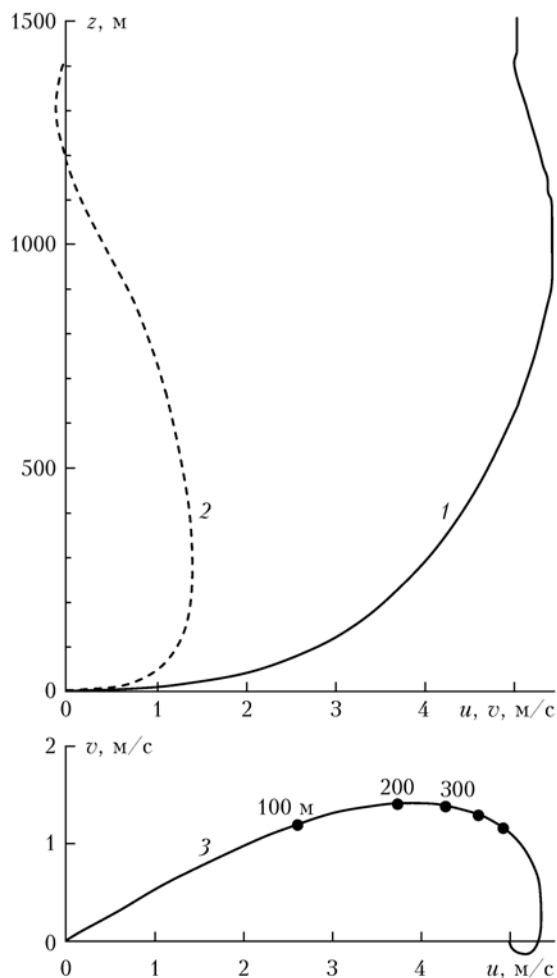


Рис. 4. Расчетная вертикальная структура компонентов скорости u , v (кривые 1, 2) и спираль Экмана (кривая 3)

характеристикой искажения геометрии следа на подстилающей поверхности.

Заключение

На основе решения уравнения переноса тяжелой неоднородной примеси в атмосфере разработана модель реконструкции поля поверхностной концентрации примеси по данным наблюдений. Для восстановления полей выпадений требуется относительно небольшое количество опорных точек наблюдений. Проведена апробация предложенной модели реконструкции на данных экспериментальных исследований аэрозольных выпадений бенз(а)пирена в окрестностях ТЭЦ-3 г. Барнаула. Получено вполне удовлетворительное согласие результатов численного моделирования и данных наблюдений.

С использованием данных мониторинга загрязнения снежного покрова и модельных описаний поля ветра в пограничном слое атмосферы на примере высотной трубы ТЭЦ-3 г. Барнаула показана необходимость учета сведений о повторяемости направлений ветра во всем слое распространения примеси. В данном случае информации только о приземной розе ветров в моделях прямого моделирования и для

численной реконструкции поля концентрации примеси явно недостаточно, поскольку возникают существенные расхождения с данными натурных наблюдений. Следует также отметить, что в зимнее время доминирующий вынос бенз(а)пирена происходит в сторону города, что указывает на неудачное размещение промплощадки ТЭЦ и в конечном итоге приводит к заметному дополнительному загрязнению атмосферы г. Барнаула.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 4.9-3.

1. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 263 с.
2. Браун Р.А. Аналитические методы моделирования планетарного пограничного слоя. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 151 с.
3. Орленко Л.Р. Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 370 с.
4. Динамическая метеорология / Под ред. Д.Л. Лайхмана. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 608 с.
5. Ломакина Н.Я., Комаров В.С., Ильин С.Н. Статистические модели высотного распределения температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Восточной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 629–632.
6. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф.Т.М. Ньистада и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 351 с.
7. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 278 с.
8. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 273 с.
9. Рапута В.Ф., Коковкин В.В., Девятова А.Ю. Сравнительная оценка состояния длительного загрязнения атмосферы и снежного покрова г. Новосибирска на сети стационарных постов Гидрометеослужбы // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 499–504.
10. Макухин В.Л., Янченко Н.И., Баранов А.Н. Исследование процессов распространения, трансформации и осаднения соединений фтора и серы в районе г. Братска // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 525–528.
11. Беляев С.П., Бесчастнов С.П., Хомулику Г.М., Моршина Т.И., Шилина А.И. Некоторые закономерности загрязнения природной среды продуктами сгорания каменного угля на примере г. Кызыла // Метеорол. и гидрол. 1997. № 12. С. 54–63.
12. Суковатов К.Ю., Безуглова Н.Н., Шутова К.О. Функции плотности вероятности концентраций аэрозоля в воздухе промышленного города (на примере г. Барнаула) // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 3. С. 194–195.
13. Филимоненко Е.А., Таловская А.В., Язиков Е.Г. Особенности вещественного состава пылевых атмосферных выпадений в зоне воздействия предприятия топливно-энергетического комплекса (на примере Томской ГРЭС-2) // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 896–901.
14. Прессман А.Я. О распространении в атмосфере тяжелой неоднородной примеси из мгновенного точечного источника // Инженерно-физ. ж. 1959. Т. 2, № 3. С. 78–87.
15. Таловская А.В., Рапута В.Ф., Филимоненко Е.А., Язиков Е.Г. Экспериментальные и численные исследования длительного загрязнения снегового покрова ураном и торием в окрестностях теплоэлектростанции (на примере

- Томской ГРЭС-2) // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 8. С. 642–646.
16. *Климат Новосибирска* / Под ред. С.Д. Кошинского и Ц.А. Швер. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 221 с.
17. *Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики*. М.: Наука, 1972. 735 с.
18. *Зилитинкевич С.С. Динамика пограничного слоя атмосферы*. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 292 с.
19. *Роди В. Модели турбулентности окружающей среды // Методы расчета турбулентных течений* / Под ред. В. Кольмана. М.: Мир, 1984. С. 227–322.
20. *Шлычков В.А. Численная модель пограничного слоя атмосферы с детализацией конвективных процессов на основе вихреразрешающего подхода // Аэрозоли Сибири* / Под ред. К.П. Куценого. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. С. 372–389.

V.F. Raputa, V.A. Shlychkov, A.A. Lezhenin, A.N. Romanov, T.V. Yaroslavtseva. Numerical analysis of aerosol substance fallout from a high-altitude source.

A model based on a substance transport equation for the reconstruction of polydisperse substance fallout from a continuous high-altitude source is proposed. The model is put to an evaluation test with field and laboratory data on benzoperin pollution of snow cover in the vicinity of Power Station-3 in the city of Barnaul. The effects of wind direction changes in the atmospheric boundary layer on the formation of long-term aerosol substance fallout are estimated.