

В.Ф. Рапута, В.В. Коковкин, О.В. Шуваева

Исследование процессов регионального переноса пыли с территории города

ИВМиМГ СО РАН,
ИНХ СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 27.11.2001 г.

На основе интегральной теоремы о среднем разработана малопараметрическая модель длительного регионального загрязнения местности площадным источником. Проведена апробация модели на данных маршрутных наблюдений пылевого загрязнения снега в окрестности г. Искитим Новосибирской области. Приводятся оценки уровней содержания загрязняющих веществ на маршрутах наблюдений и обсуждаются связи их с зимней повторяемостью направлений ветра в пограничном слое атмосферы.

Введение

Промышленные центры являются мощными источниками выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, многие из которых переносятся на аэрозольных частицах. Вредные примеси оказывают воздействие на окружающую среду, меняя ее химические и физические характеристики. Происходит интенсивное формирование антропогенно измененных биогеохимических провинций в окрестностях городов [1–3].

Несмотря на большое количество работ по исследованию загрязнения воздуха городов и их окрестностей, количественные закономерности этого процесса выявлены не достаточно полно. При попытках получения детальной картины загрязнения возникает ряд весьма сложных задач информационного обеспечения и математического описания процессов переноса атмосферных примесей.

В связи с возникающими проблемами целесообразно провести разделение процессов локального и регионального переноса. При локальном загрязнении существенны такие факторы, как высота источника выброса, характеристики вертикального турбулентного обмена, изменение скорости ветра с высотой, неоднородности подстилающей поверхности и т.д. [4, 5]. Анализ данных экспериментальных и теоретических исследований показывает, что для легкой примеси на удаленностях 7–10 км от источника выброса эти факторы практически не влияют на уровень концентрации как вблизи подстилающей поверхности, так и во всем слое перемешивания. В результате возникает возможность малопараметрического описания процессов регионального загрязнения [6–8].

1. Оценивание регионального загрязнения

Пусть ось x направлена на восток, ось y на север, а S – плоскостной источник, представляющий

собой территорию города. Концентрацию слабо оседающей примеси за длительный промежуток времени (месяц, сезон, год) от точечного источника опишем с помощью соотношения [5, 8]:

$$q(x, y) = \frac{m(\xi, \eta)P(\varphi + 180^\circ)}{2\pi uH \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}}, \quad (1)$$

где (ξ, η) – координаты источника, $(\xi, \eta) \in S$; $m(\xi, \eta)$ – эмиссия примеси из этой точки; $P(\varphi)$ – роза ветров за рассматриваемый промежуток времени; u и H – средняя скорость ветра и высота слоя перемешивания; $\varphi(\xi, \eta) = \arctg [(y - \eta)/(x - \xi)]$.

Предполагается, что точка (x, y) удалена от источника на расстояние более 7–10 км. В этом случае соотношение (1) достаточно надежно описывает процессы длительного загрязнения местности для таких расстояний.

Обозначим через $m(\xi, \eta)$ функцию, описывающую эмиссию слабо оседающей примеси в атмосферу города. Тогда с учетом (1) концентрацию от площадного источника S можно представить в виде

$$Q(x, y) = \frac{1}{2\pi uH} \iint_S \frac{m(\xi, \eta)P(\arctg \frac{y - \eta}{x - \xi} + 180^\circ)}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} d\xi d\eta. \quad (2)$$

Здесь также предполагается, что точка (x, y) достаточно удалена от множества S .

Функция $m(\xi, \eta)$, как правило, неизвестна либо известна достаточно приближенно. В этом случае интерпретация данных наблюдений с помощью (2) становится весьма затруднительной. Ситуация может быть существенно улучшена, если выражение (2) преобразовать, используя обобщенную теорему о среднем из интегрального исчисления [9]. Согласно этой теореме для двух произвольных непрерывных функций на

связном компактном множестве имеет место следующее равенство:

$$\iint_S f(\xi, \eta)g(\xi, \eta)d\xi d\eta = f(\lambda, \mu) \iint_S g(\xi, \eta)d\xi d\eta, \quad (3)$$

где $(\lambda, \mu) \in S$ и дополнительно предполагается, что $g(\xi, \eta) \geq 0$ на множестве S .

В нашем случае, полагая, что $g(\xi, \eta) = m(\xi, \eta)$,

$$f(\xi, \eta) = \frac{P(\arctg \frac{y-\eta}{x-\xi} + 180^\circ)}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}},$$

получаем достаточно простое соотношение:

$$Q(x, y) = \frac{\theta P(\arctg \frac{y-\mu}{x-\lambda} + 180^\circ)}{\sqrt{(x-\lambda)^2 + (y-\mu)^2}}, \quad (4)$$

где $\theta = M/(2\pi uH)$, $M = \iint_S m(\xi, \eta)d\xi d\eta$ – суммарное поступление примеси с территории города.

Анализ зависимости (4) показывает, что для определения функции $Q(x, y)$ достаточно оценить неизвестные параметры θ, λ, μ , используя, например, данные наблюдений. Ситуация может быть более упрощена, если известно положение на территории города доминирующего точечного источника. В этом случае $\lambda = x_0, \mu = y_0$, где (x_0, y_0) – координаты эффективного источника.

2. Экспериментальные условия

В конце зимних сезонов 2000 и 2001 гг. в районе г. Искитима Новосибирской области проводились маршрутные снегориски. Точки пробоотбора располагались на удалении до 15 км от цементного завода, который находится в северной части города.

Город Искитим расположен в 30 км южнее г. Новосибирска, в долине реки Бердь. Уровень загрязнения атмосферы значительно выше, чем в среднем для городов России. Основной вклад в загрязнение вносит Чернореченский цементный завод (более 70%). Под факелом завода на удалении до 1500 м превышение предельно допустимой концентрации по пыли может составлять более 10 раз. Также в воздухе высокая концентрация бенз(а)пирена и сажи. Наиболее загрязнена северная часть города, расположенная в котловине.

Самая высокая среднезимняя повторяемость ветров в пограничном слое атмосферы у ветров юго-западного и западного направлений (более 50%) [10]. В связи с этим маршруты пробоотбора были ориентированы на северо-восток и восток. Наблюдения, в основном, проводились в интервале расстояний от 6 до 15 км на ровных и открытых участках местности.

3. Численное моделирование

Предварительный анализ климатической информации о среднезимней повторяемости направлений ветра в пограничном слое атмосферы [10], основных источниках выбросов атмосферных примесей г. Искитима, данных измерений в снеге загрязняющих веществ показывает, что координаты эффективного точечного источника следует задать в районе цементного завода. В этом случае задача определения параметров в регрессионной зависимости (4) сильно упрощается и состоит в оценивании величины θ . Для ее вычисления достаточно использовать данные наблюдений по рассматриваемому маршруту в одной опорной точке. Опорные точки, с одной стороны, следует выбирать не слишком далеко от территории города, поскольку устойчивость оценивания параметров зависимости (4) к ошибкам измерений убывает с расстоянием. С другой стороны, их не следует располагать слишком близко, чтобы избежать существенной систематической погрешности.

На рис. 1 приведены результаты восстановления в направлении восток-северо-восток (маршрут 1) от

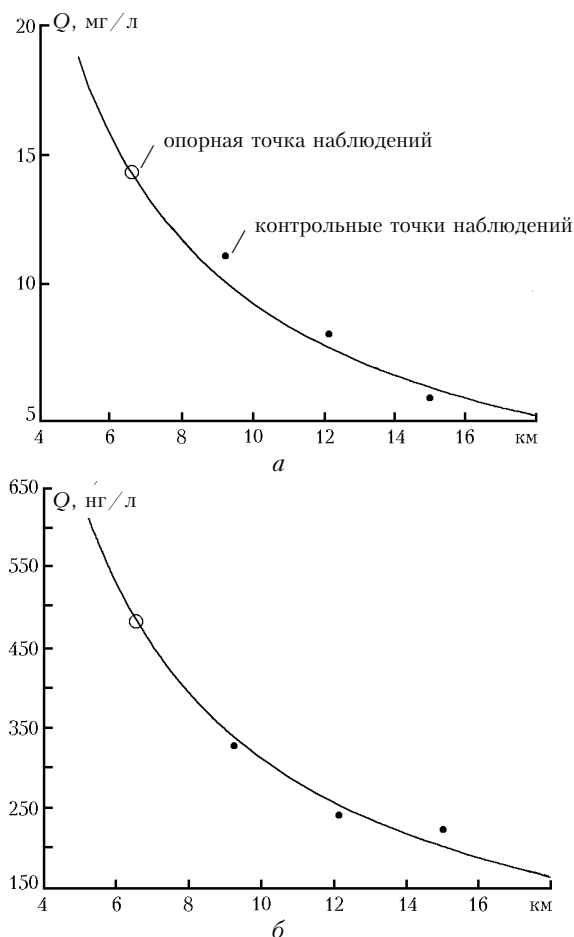


Рис. 1. Восстановленное и измеренное удельное содержание пыли (а) и суммы ПАУ (б) на маршруте 1. Нижняя ось – расстояние от источника

цементного завода концентраций пыли, полиароматических углеводородов (ПАУ). Для оценивания пара-

метров регрессий использовались данные маршрутных съемок, проведенных в конце зимнего сезона 2001 г. На рис. 2 представлено восстановление в северо-восточном направлении (маршрут 2) концентрации кадмия,

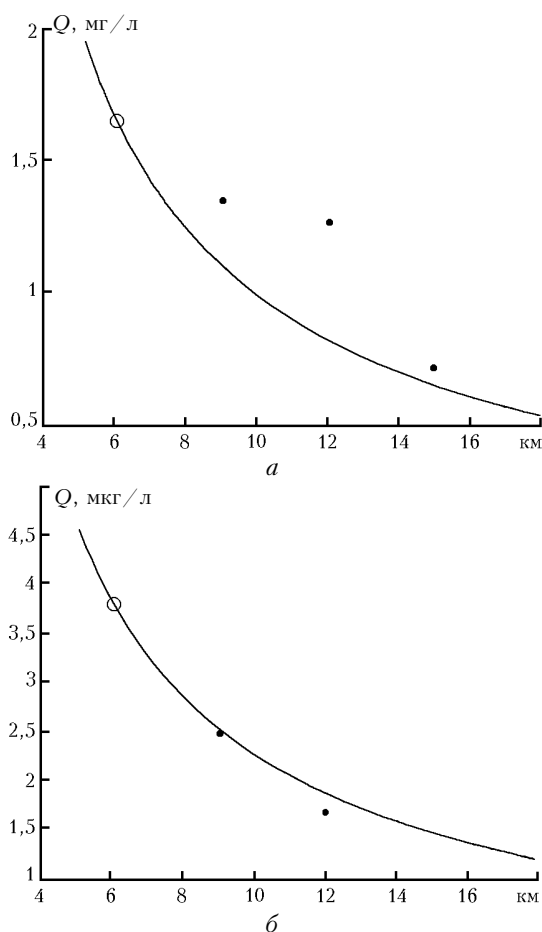


Рис. 2. Удельное содержание в снеге на маршруте 2 водорастворенной формы кальция (а) и кадмия (б)

водорастворенной формы кальция. Данные, приведенные на рис. 2, относятся к концу зимнего сезона 2000 г. Для оценивания величины θ в зависимости (4) использовались точки, удаленные от завода на расстояния порядка 6 км. Остальные точки пробоотбора в этом случае могут быть использованы для контроля точности восстановления. Из рис. 1, 2 следует, что уровень соответствия измеренных и вычисленных значений концентраций является достаточно высоким.

Анализ табл. 1 показывает, что с увеличением высоты происходит достаточно контрастное перераспре-

Таблица 1
Зимняя повторяемость (%) направлений ветра на разных высотах

Направление ветра	Высота, км			
	Флюгер	0,1	0,2	0,5
ЮВ	36	8	6	8
Ю	48	25	17	10
ЮЗ	5	32	36	29
З	1	13	18	28

Примечание. На уровне флюгера дана январская повторяемость направлений ветра.

деление повторяемости основных направлений ветра с южного и юго-восточного на юго-западное и западное. Это связано как с локальными факторами (город расположен в котловине, вытянутой примерно с юга на север), так и глобальными причинами, обусловленными преимущественным западно-восточным переносом воздушных масс. С учетом повторяемости направлений ветра в пограничном слое атмосферы данные табл. 2 позволяют восстановить картину регионально-го загрязнения окрестностей Искитима и оценить сум-

Таблица 2
Оценки параметра θ для маршрутов 1 и 2

Компонент	θ_1	θ_2	θ_1/θ_2
Пыль	93,5	78,7	1,18
ПАУ	3100	2200	1,4
Cd	16,3	12,6	1,29
Ca ²⁺	12,5	9,9	1,26
NH ₄ ⁺	2,6	2,1	1,24
Удельная электропроводность	16,1	12,6	1,27

марный вынос пылевых выбросов от источников города. Любопытно отметить, что, несмотря на почти равную повторяемость юго-западного и западного направлений ветра на высоте 0,5 км, уровень выпадений на маршруте 1 заметно выше, чем на маршруте 2. Данное обстоятельство указывает на более высокую повторяемость ветров относительно маршрута 1. Следует ожидать, что в направлении этого маршрута суммарный вынос загрязняющих аэрозольных примесей достигал максимальных значений для зимних сезонов 1999–2001 гг.

Заключение

Проведенное исследование позволило получить количественные закономерности картины регионального распространения пыли, полиароматических углеводородов, тяжелых металлов, макрокомпонентов в окрестностях г. Искитим. По мере удаления от города происходит существенное перераспределение направлений основных выносов аэрозольных примесей с северного и северо-западного на северо-восточное и восточное. Это в определенной степени связано как со спецификой местности, так и с динамикой атмосферных процессов.

Полученные закономерности пылевых выпадений в окрестностях города могут быть использованы для поиска корреляционных связей между концентрацией пыли в снеге и альбедо снежного покрова, поскольку в период снеготаяния изменения альбедо пропорциональны уровню загрязнения снежного покрова и тесно связаны с вариациями плотности изображения ореола загрязнения на аэро- и космоснимках.

Использование интегральной теоремы о среднем значении функции дало возможность совершить переход от решения бесконечномерной задачи определения мощности эмиссии примеси от площадного источника к задаче конечномерной с небольшим числом параметров. Однако для решения полученной задачи необходимо проведение дополнительных исследований,

связанных с разработкой эффективных численных алгоритмов и оптимизацией системы наблюдений.

Работа выполнена при поддержке средствами интеграционного проекта СО РАН № 64 и проекта РФФИ № 00-15-98543.

1. *Батчер С., Чарлсон Р.* Введение в химию атмосферы. М.: Мир, 1977. 270 с.
2. *Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 180 с.
3. *Бояркина А.П., Байковский В.В., Васильев Н.В., Глухов Г.Г., Медведев М.А., Писарева Л.Ф., Резников В.И., Шелудько С.И.* Аэрозоли в природных ландшафтах Сибири. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1993. 159 с.
4. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примеси* / Под ред. Ф.Т.М. Ньистадта и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 350 с.
5. *Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н.* Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 279 с.
6. *Кудрявцева Л.В., Устинова С.Н.* Оценка вклада дальнего переноса соединений серы и азота в их поступление в оз. Байкал // Мониторинг и оценка состояния Байкала и Прибайкалья. Л.: Гидрометеоздат, 1991. С. 86–92.
7. *Рапута В.Ф., Ходжер Т.В., Горшков А.Г., Куценогий К.П.* Некоторые закономерности загрязнения окрестностей Иркутска полиароматическими углеводородами // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 650–653.
8. *Рапута В.Ф., Королева Г.П., Горшков А.Г., Ходжер Т.В.* Исследование процессов длительного загрязнения окрестностей Иркутска тяжелыми металлами // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 623–626.
9. *Камышин Л.И.* Курс математического анализа. М.: Изд-во МГУ, 1995. Т. 2. 624 с.
10. *Климат* Новосибирска. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 224 с.

V.F. Raputa, V.V. Kokovkin, O.V. Shuvaeva. The study of regional dust transfer from a city area.

On the basis of integral theorem on average, a low-parametric model of long-term regional contamination of territory from some area source is worked out. The approbation of the model is carried out on the data of route observation of snow contamination by dust in the vicinity of Iskitim in Novosibirsk district. The relationships are discussed and the evaluations of content levels of polluting admixtures along the routes of observation and winter wind direction repetitions in the boundary layer of the atmosphere are presented.