

Реконструкция поля аэрозольных выпадений примеси от совокупности источников

В.Ф. Рапута¹, Н.П. Ахматова², Т.В. Ярославцева^{3*}

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

²Новосибирская государственная академия водного транспорта
630090, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33

³Новосибирский НИИ гигиены Федеральной службы по надзору
в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
630108, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 7

Поступила в редакцию 9.02.2015 г.

Разработана модель реконструкции поля выпадений аэрозольной примеси от совокупности источников. Проведена апробация модели на данных натурных исследований загрязнения снежного покрова выбросами от двух источников – ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 г. Новосибирска. Величина случайной среднеквадратической погрешности модели находится в пределах 4–6 мг/л. Оценки суммарных выпадений аэрозольных частиц в радиусе 3 км от ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 в зимнем сезоне 2013/14 г. составили 61 и 10 т соответственно.

Ключевые слова: примесь, атмосфера, снежный покров, загрязнение, численное моделирование, реконструкция; impurity, atmosphere, snow, pollution, numerical modeling, reconstruction.

Введение

Численному восстановлению полей аэрозольных выпадений примесей по данным точечных измерений концентраций посвящены работы [1–5]. В них обсуждаются проблемы реконструкции полей наземных концентраций от одиночного источника или от близкорасположенных источников выбросов оседающих в атмосфере примесей. Исследование случаев достаточно удаленных друг от друга источников, допускающих существенное взаимное наложение полей выпадений, заметно сложнее как в экспериментальном плане, так и в последующей численной интерпретации результатов наблюдений. В этой ситуации при проведении натурных исследований необходимо более тщательное планирование размещения точек отбора проб с учетом геометрических и динамических параметров источников, априорных сведений о характеристиках дисперсного состава примесей, текущих гидрометеорологических и климатических условий, пространственных ограничений на размещение системы наблюдений в условиях города и т.д. В теоретическом плане происходит значительное увеличение в моделях реконструкции количества оцениваемых параметров, даже с использованием малопараметрических описаний процессов распространения примесей [4–8]. Это приводит к необходимости

разработки алгоритмов решения возникающих оптимизационных задач, привлечения методов теории планирования экспериментов, дополнительного учета априорных сведений о размещении и характеристиках источников примеси [3, 4].

Типичными примерами выбросов в атмосферу города аэрозольных примесей являются угольные теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). В выбросах ТЭЦ содержатся тяжелые металлы и их соединения, полиароматические углеводороды, присутствуют также радиоактивные элементы [6, 9–11]. Их наличие приводит к возникновению проблемы долговременного радиоактивного заражения местности.

1. Экспериментальные исследования

Топливо-энергетический комплекс г. Новосибирска включает в себя несколько крупных ТЭЦ, а также около 200 мелких и средних котельных [11]. В качестве основного топлива на ТЭЦ используются каменные угли Кузнецкого и бурые угли Канско-Ачинского месторождений.

Для оценки влияния ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 г. Новосибирска на состояние атмосферного воздуха и территорий города весьма удобно использовать снеговые пробы, отобранные с учетом условий переноса и рассеяния загрязняющих веществ [6, 12]. Маршрутный отбор проб снега в окрестностях ТЭЦ проводился 12 марта 2014 г. Схема отбора проб показана на рис. 1. Точки пробоотбора размещались на открытых участках местности с учетом расположения

* Владимир Федотович Рапута (raputa@sscc.ru); Наталья Петровна Ахматова (ahmatova_natalya@mail.ru); Татьяна Владимировна Ярославцева (tani-ta@list.ru).

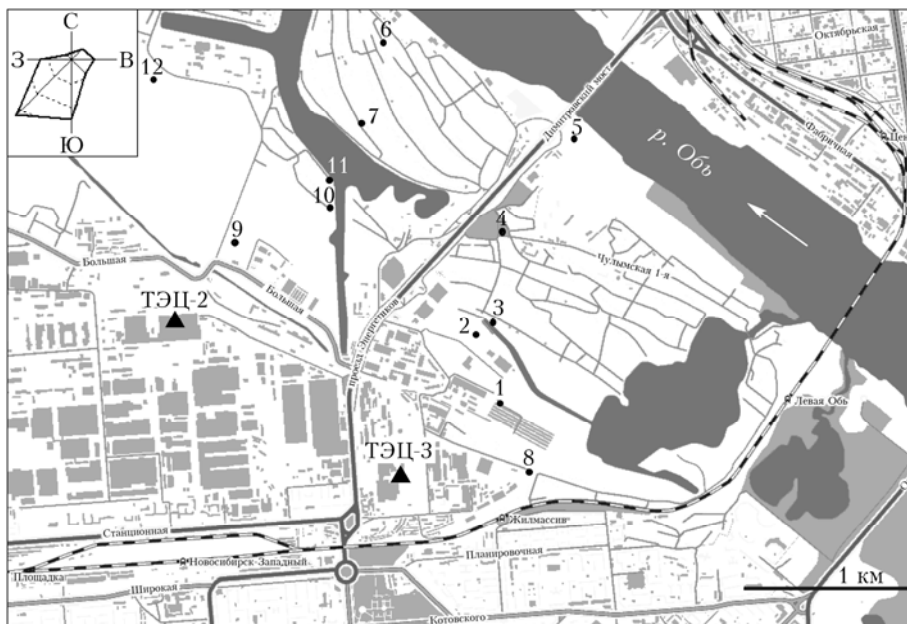


Рис. 1. Схема отбора проб снега. Среднезимняя роза ветров на высоте 100 м. ▲ – положение труб ТЭЦ

Таблица 1

Содержание твердого осадка в растопленных снеговых пробах, взятых в окрестностях ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 (12 марта 2014 г.)

Параметр	Номер точки											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Объемная концентрация, мг/л	50	146	87	80	102	58	63	20	93	68	79	67
Площадная концентрация, г/м ²	4,1	13,1	7,5	6,3	7,6	4,4	5,8	2,1	9,1	5,6	4,9	5,8

застройки, ближайших локальных источников (автогассы, частный сектор, мелкие котельные), лесной и парковой зоны. Выполнение перечисленных условий в пределах города является непростой задачей, и, как правило, успешность ее решения устанавливается на более поздних стадиях исследования при интерпретации данных наблюдений [12].

Пробы снега отбирались при помощи пластиковой трубы на участках, где сохранился неповрежденный снеговой покров. Лабораторная обработка снеговых проб заключалась в фильтровании растаявшего снега и в последующем определении сухого осадка. Результаты экспериментальных измерений объемных и площадных концентраций аэрозольных выпадений в районе ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 представлены в табл. 1.

Полученные данные позволяют сделать следующие предварительные выводы:

- результаты измерений пространственного распределения выпадений от труб ТЭЦ вполне согласуются с зимней повторяемостью направлений ветра [13];
- с помощью совместного анализа данных наблюдений, представленных в табл. 1, и розы ветров, приведенной на рис. 1, выявлено, что наибольший вклад в аэрозольное загрязнение исследуемой территории обусловлен выбросами ТЭЦ-2;

– количество осадка выпавших частиц на маршрутах наблюдений в целом монотонно снижается по мере удаления как от ТЭЦ-2, так и от ТЭЦ-3. Заметно большие значения в некоторых пробах снега можно объяснить локальным влиянием близко находящихся источников.

2. Модель реконструкции аэрозольных выпадений примеси от совокупности источников

В монодисперсном приближении в случае одиночной трубы поле плотности выпадений примеси $\Phi(r, \varphi)$ на снежный покров описывается с помощью следующей регрессионной зависимости [6, 14]:

$$\Phi(r, \varphi, \theta) = A(r, \theta)P(\varphi + 180^\circ), \quad (1)$$

где

$$A(r, \theta) = \theta_1 r^{\theta_2} e^{-\frac{2r_m}{r}}; P - \text{роза ветров.} \quad (2)$$

Оценки неизвестных параметров θ_1, θ_2 могут быть найдены с использованием данных наблюдений, например, методом наименьших квадратов. Параметр r_m определяется через геометрические характеристики источника [15, 16].

Регрессионная зависимость (1) позволяет проводить восстановление полей аэрозольных выпадений примесей по сравнительно небольшому числу опорных точек измерения [2, 6]. Остальные точки пробоотбора могут использоваться для проверки адекватности предложенной модели восстановления.

Пусть в плоскости (x, y) расположены два источника с координатами (x_1^0, y_1^0) и (x_2^0, y_2^0) . Тогда с учетом соотношений (1), (2) суммарное поле выпадений примеси от обоих источников можно представить в виде

$$\Phi(x, y, \theta, \mathbf{S}) = \theta_1 \Phi_1(r, \varphi, \theta_2) + S_1 \Phi_2(\rho, \psi, S_2), \quad (3)$$

где

$$\Phi_1(r, \varphi, \theta_2) = r^{\theta_2} e^{-\frac{2r_{\max}}{r}} P(\varphi + 180^\circ),$$

$$r = \sqrt{(x - x_1^0)^2 + (y - y_1^0)^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{y - y_1^0}{x - x_1^0},$$

$$\Phi_2(\rho, \psi, S_2) = \rho^{S_2} e^{-\frac{2\rho_{\max}}{\rho}} P(\psi + 180^\circ),$$

$$\rho = \sqrt{(x - x_2^0)^2 + (y - y_2^0)^2}, \quad \psi = \arctg \frac{y - y_2^0}{x - x_2^0}.$$

Если использовать данные наблюдений в четырех точках местности, то для определения неизвестных параметров $(\theta_1, \theta_2, S_1, S_2)$ необходимо решить следующую систему четырех нелинейных уравнений:

$$\Phi(x_j, y_j, \theta, \mathbf{S}) = C_j, \quad j = \overline{1, 4}. \quad (4)$$

Здесь C_j – концентрация примеси, измеренная в точке (x_j, y_j) .

При численном решении системы уравнений (4) следует в первую очередь исключить параметры θ_1 и S_1 , входящие в нее линейно. В результате задача сводится к системе двух нелинейных уравнений для нахождения θ_2 и S_2 , решение которой можно найти вполне стандартными методами [3].

3. Численная реконструкция суммарного поля аэрозольных выпадений от ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3

На рис. 2 представлены результаты реконструкции поля выпадений от ТЭЦ-2 по модели (2) и данным наблюдений, пронормированным к зимней повторяемости ветров юго-западного направления. Для оценки параметров θ_1, θ_2 были использованы измеренные концентрации выпавших частиц в опорных точках № 4 и 8. Степень соответствия измеренных и вычисленных значений концентраций проводилась по точкам № 1–3, 5–7, 10, 11, расположенным в северо-восточном секторе выноса аэрозольного шлейфа от станции. Сравнительный анализ полученных результатов численного моделирования с данными наблюдений, выполненный с применением методов из [17], показал их вполне удовлетворительное согласие. При этом величина случайной среднеквадратической погрешности численной модели составила 4–6 мг/л.

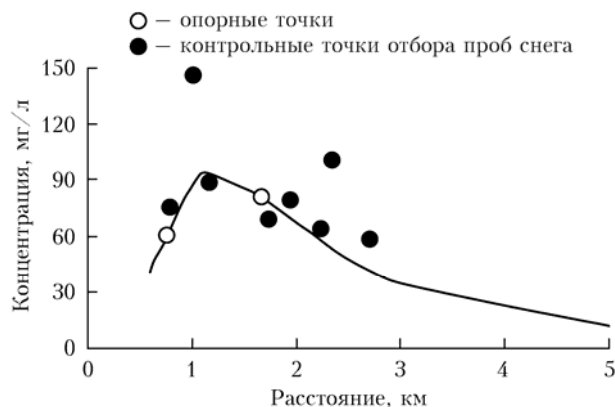


Рис. 2. Измеренная и восстановленная по модели (2) для ТЭЦ-2 концентрация выпавших частиц, нормированная к зимней повторяемости ветров юго-западного направления

На рис. 3 приведено восстановленное на основе модели (3) совокупное поле выпадений от ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3. В соответствии с розой ветров максимумы выпадений на рис. 3 расположены в северо-восточных направлениях от ТЭЦ на расстояниях около 1 км, что подтверждает, учитывая значительную высоту труб, существенную неоднородность в зимнее время дисперсного состава выбросов. Анализ рис. 4 показывает заметные превышения измеренных значений концентрации выпавших частиц в точках № 2, 5, 12 по сравнению с вычисленными по модели (3) значениями. Эти отклонения могут быть обусловлены дополнительным поступлением примесей от близкорасположенных локальных источников (автотрассы, частный сектор, пылящие поверхности и др.).

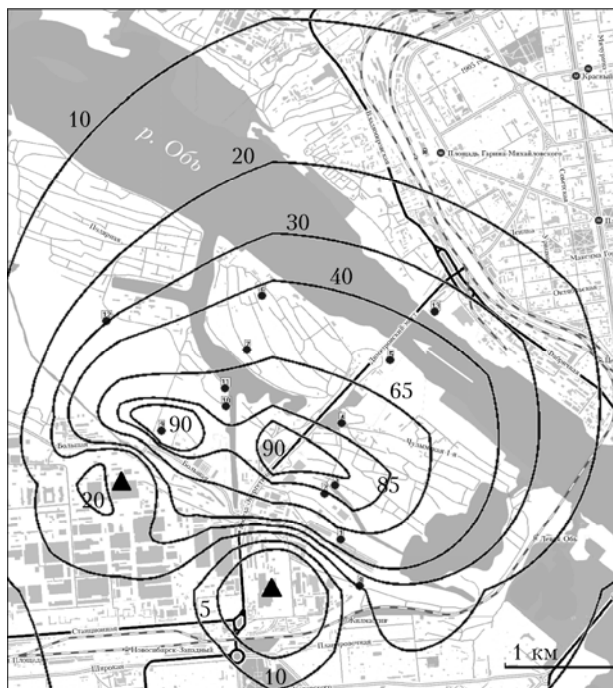


Рис. 3. Восстановленное с использованием зависимости (3) суммарное поле выпадений (мг/л) от ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 в зимнем сезоне 2013/14 г.

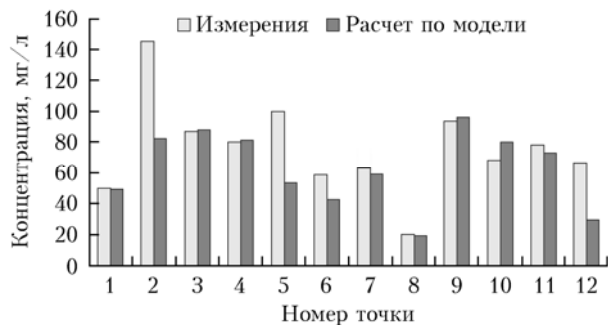


Рис. 4. Измеренная и восстановленная на основе модели (3) концентрация выпавших частиц в точках отбора проб снега

4. Оценка суммарных аэрозольных выпадений

Одной из основных характеристик источника является выброс из него примеси за определенный промежуток времени. Если поле выпадений количественно восстановлено по данным наблюдений, например, с использованием зависимостей типа (1), (3), то возникает возможность экономичным способом оценить суммарный выброс примесей от источника на основе следующего соотношения:

$$Q_{sum} = \iint_{\Omega} \Phi(x, y) dx dy, \quad (5)$$

где Ω – территория вокруг источника, на которую происходит выпадение; $\Phi(x, y)$ – плотность выпадений, представленная в декартовых координатах.

Если область Ω является кольцеобразной относительно источника, то соотношение (5) представляется в более удобном виде

$$Q_{sum} = \int_0^{2\pi} P(\varphi + 180^\circ) d\varphi \int_{R_1}^{R_2} A(r, \theta_1, \theta_2) r dr. \quad (6)$$

Здесь R_1, R_2 – расстояния от источника.

Соотношение (6) позволяет упростить вычисление суммарных аэрозольных выпадений в радиальных областях. С использованием соотношения (6) в табл. 2 представлены оценки суммарных атмосферных выпадений взвешенных веществ на различных территориях г. Новосибирска от ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 за зимний сезон 2013/14 г.

Таблица 2

Оценки суммарных аэрозольных выпадений в радиусе 1, 2, 3 км от ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3

Источник	Масса выпадений в радиусе, т		
	1 км	2 км	3 км
ТЭЦ-2	5	34	61
ТЭЦ-3	5	9	10

Оценки суммарных выпадений выполнены с использованием монодисперсной модели реконструкции (1), (2) и оценок параметров $(\theta_1, \theta_2, S_1, S_2)$. Область применения этой модели зависит как от степени разнородности дисперсного состава выбрасываемой в ат-

мосферу примеси из высотных труб ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, так и от степени воздействия процессов вымывания ледяной крупой на нее в факеле выброса [10]. Дальнейшее уточнение полей концентраций и оценок суммарных выпадений следует проводить с использованием полидисперсных моделей реконструкции и более детальных систем мониторинга.

Заключение

Анализ результатов натурных исследований проб снега показал, что загрязнение левобережной части г. Новосибирска выбросами ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 относительно невелико. В целом на маршрутах пробоотбора по мере удаления от ТЭЦ прослеживается характерная динамика уменьшения концентраций выбросов. Интенсивность выноса примесей по направлениям вполне согласуется с зимней розой ветров.

На основе постановок обратных задач переноса примесей и данных наблюдений по ограниченному числу опорных точек построена малопараметрическая модель реконструкции полей аэрозольных выпадений от совокупности источников. Предложены алгоритм ее численной реализации и метод оценивания суммарных выпадений. Оценки суммарных выпадений аэрозольных примесей в радиусе 3 км от ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 г. Новосибирска в зимнем сезоне 2013/14 г. составили 61 и 10 т соответственно.

Численный анализ данных мониторинга снегового покрова в окрестностях ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 г. Новосибирска выявил существование достаточно простых закономерностей формирования полей длительного загрязнения местности. Сопоставление рассчитанных значений концентраций с измерениями в контрольных точках наблюдений показало их удовлетворительное согласие. Величина случайной среднеквадратической погрешности численной модели составила 4–6 мг/л. Результаты численного моделирования позволяют сделать вывод о том, что загрязнение от стационарных источников ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 проявляется на весьма обширной территории города, хорошо прослеживается зона максимальных выпадений от этих станций. Вынос аэрозольных примесей от ТЭЦ в правобережную часть города сравнительно небольшой. Однако следует отметить, что этот вклад представлен в основном мелкодисперсной фракцией частиц.

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

1. Израэль Ю.А., Цатуров Ю.С., Назаров И.М., Петров В.Н., Стукин Е.Д., Фридман Ш.Д., Кантарович Р.С., Федоткин А.Ф., Керцман В.М. Реконструкция фактической картины радиоактивного загрязнения местности в результате аварий и ядерных испытаний // Метеорол. и гидрол. 1994. № 8. С. 5–18.
2. Таловская А.В., Рапуга 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 атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 8. С. 642–646.

3. Pitovranov S.E., Fedorov V.V., Edwards L.L. Optimal sampler siting for atmospheric tracer experiments taking into account uncertainties in the wind field // *Atmos. Environ.* A. 1993. V. 27, N 7. P. 1053–1059.
4. Седунов Ю.С., Борзилов В.А., Клепикова Н.В., Чернокожин Е.В., Троянова Н.И. Физико-математическое моделирование регионального переноса в атмосфере радиоактивных веществ в результате аварии на Чернобыльской АЭС // *Метеорол. и гидрол.* 1989. № 9. С. 5–10.
5. Рапута В.Ф., Шлычков В.А., Леженин А.А., Романов А.Н., Ярославцева Т.В. Численный анализ данных аэрозольных выпадений примесей от высотного источника // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 8. С. 713–718.
6. Рапута В.Ф., Коковкин В.В., Садовский А.П., Олькин С.Е., Резникова И.К., Морозов А.В. Анализ аэрозольных выпадений в окрестностях ТЭЦ г. Новосибирска // *Оптика атмосфер. и океана.* 2003. Т. 16, № 5–6. С. 546–551.
7. Суковатов К.Ю., Безуглова Н.Н., Шутова К.О. Функции плотности вероятности концентраций аэрозоля в воздухе промышленного города (на примере г. Барнаул) // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 3. С. 194–195.
8. Прессман А.Я. О распространении в атмосфере тяжелой неоднородной примеси из мгновенного точечного источника // *Инженерно-физич. журн.* 1959. Т. 2, № 3. С. 78–87.
9. 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.
10. Беляев С.П., Бесчастнов С.П., Хомушук 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.
11. *Состояние окружающей природной среды в Новосибирской области в 2000 г.* Доклад Департамента природных ресурсов по Сибирскому региону / Под ред. Г.В. Селливерстова, В.Ю. Александрова. Новосибирск, 2001. 144 с.
12. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 182 с.
13. *Климат Новосибирска* / Под ред. С.Д. Кошинского, Ц.А. Швер. Л.: Гидрометеониздат, 1979. 221 с.
14. Берлянд М.Е., Генихович Е.Л., Чичерин С.С. Теоретические основы и методы расчетов поля среднегодовых концентраций примеси от промышленных источников // *Труды ГГО.* 1984. Вып. 479. С. 3–16.
15. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 273 с.
16. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 278 с.
17. Щелканов Н.Н. Методы вычисления случайных погрешностей параметров окружающей среды из экспериментальных данных // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 9. С. 815–821.

V.F. Raputa, N.P. Akhmatova, T.V. Yaroslavtseva. Reconstruction of aerosol fallout fields from a series of sources.

A model of aerosol fallout fields from a series of sources has been developed. Aprobation of the model on data from field studies of snow dust pollution in the vicinity of thermal power station 2 and thermal power station 3 of Novosibirsk was carried out. The magnitude of the random RMS error is between 4–6 mg/l. The estimate of the total fallouts of dust from sources within a radius of 3 km from TPS 2 and TPS 3 in the winter season 2013–2014 was 61 and 10 tons, respectively.