

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ВЫПАДЕНИЙ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ ОТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО НАЗЕМНЫМ И СПУТНИКОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Т. В. Ярославцева¹, В. Ф. Рапута²

¹Новосибирский НИИ гигиены Роспотребнадзора, 630108, Новосибирск

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск

УДК 528.8:574

Обсуждаются экспериментальные и численные исследования полей длительных выпадений примесей на значительных удалениях от точечных и площадных источников. В качестве экспериментальных данных использовались результаты наземных и спутниковых исследований загрязнения снежного покрова в окрестностях городов и промышленных площадок Сибири. Выявлено наличие функциональной связи между изменениями тонов серого цвета по мере удаления от источника и динамикой уменьшения концентраций примесей.

Ключевые слова: загрязнение, снежный покров, спутниковые наблюдения, модель, функциональная связь.

Введение

Описание полей длительного загрязнения территорий на значительных удалениях от источника атмосферных выбросов примесей допускает существенные упрощения. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что, в зимнее время, начиная с расстояний порядка 5–7 км от источника, распределение концентрации примеси выравнивается по высоте слоя перемешивания [1]–[3]. Для таких расстояний влияние ряда параметров нивелируется. К ним следует отнести высоту источника, скорость оседания аэрозольных частиц и т.д.

Одним из наиболее надежных индикаторов контроля пространственного распространения аэрозольных примесей от атмосферных источников является снежный покров. Методы исследования состава снега освещены во многих работах [4]–[6]. В настоящее время существенным дополнением к наземным измерениям являются спутниковые наблюдения состояния снежного покрова в окрестностях городов, ТЭЦ, промышленных предприятий, крупных автомагистралей [7]–[10]. Совместное использование данных наземных и спутниковых наблюдений загрязнения снежного покрова позволяет более надёжно и детально описать поля выпадений примесей, повысить экономичность проводимых мониторинговых исследований.

1 Модели оценивания региональных выпадений примеси

При реконструкции полей концентраций требуется определённая стилизация и упрощение модельных описаний процессов переноса примесей в атмосфере. В начале ограничимся рассмотрением случая стационарного точечного источника и пусть длительный вынос примеси от него по направлениям происходит в соответствии с розой ветров. В этом случае для построения модели оценивания целесообразно воспользоваться записью полуэмпирического уравнения переноса и диффузии примеси в цилиндрической системе координат

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot u(z)q) = \frac{\partial}{\partial z} \nu(z) \frac{\partial q}{\partial z}. \quad (1)$$

Здесь ось r находится в горизонтальной плоскости и сориентирована по направлению ветра, ось z направлена вверх, $u(z)$ — горизонтальная компонента скорости ветра, ν — коэффициент вертикального турбулентного обмена. Интегрируя уравнение (1) по z от 0 до H — верхней границы пограничного слоя атмосферы, получим следующее соотношение

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \int_0^H u(z) q(r, z) dz \right) = 0. \quad (2)$$

Отсюда следует

$$\int_0^H u(z) q(r, z) dz = \frac{C}{r}, \quad (3)$$

где C — константа интегрирования.

Используя обобщённую интегральную теорему о среднем значении функции [11], получим, что

$$q(r, z_{cp}) = \frac{C}{r \cdot \bar{U}}, \quad \bar{U} = \int_0^H u(z) dz. \quad (4)$$

Учитывая, что при достаточно больших r концентрация примеси практически не зависит от z , из (4) вытекает соотношение для оценивания длительного загрязнения на значительных удалениях от источника в заданном направлении.

Константа интегрирования $C(\varphi)$ пропорциональна мощности эмиссии, повторяемости направлений ветра и обратно пропорциональна толщине слоя перемешивания и средней скорости ветра в нём, т.е.

$$C(\varphi) = \frac{M \cdot g(\varphi)}{2\pi H}, \quad (5)$$

где $g(\varphi)$ — вероятность противоположного φ направления ветра, M — мощность эмиссии, H — толщина слоя перемешивания.

Для фиксированного угла φ_0 оценка неизвестного параметра $C(\varphi_0)$ в (4) может быть найдена с использованием данных наблюдений, например по методу наименьших квадратов. Зависимость (4) позволяет проводить восстановление полей аэрозольных выпадений примесей по сравнительно небольшому числу опорных точек измерения.

Для оценивания регионального загрязнения территорий площадным источником S следует использовать достаточно компактное и вполне адекватное описание [12]:

$$Q(x, y) = \frac{\theta \cdot P(\arctan \frac{y-\mu}{x-\lambda} + 180^\circ)}{\sqrt{(x-\lambda)^2 + (y-\mu)^2}}, \quad \theta = \frac{M}{2\pi \bar{U} H}, \quad M = \iint_S m(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (6)$$

где M — суммарное поступление примеси с территории S , $m(\xi, \eta)$ — эмиссия примеси из точки (ξ, η) , принадлежащей S , P — роза ветров, λ, μ — эффективный центр выброса.

Предполагается, что точка (x, y) удалена от S на расстояние более 5–7 км.

2 Оценивание региональных выпадений от площадного источника.

На рис. 1 представлена схема отбора проб снега в северо-восточном направлении от Новосибирска и результаты численной реконструкции по модели (6) содержания цинка и хрома в снеговых пробах. В качестве опорной точки наблюдения была взята точка под номером 1, расположенная в районе пос. Мочище.

Анализ рис. 1б и 1в показывает, что в контрольных точках имеет место вполне удовлетворительное согласие между вычисленными и измеренными концентрациями тяжёлых металлов.

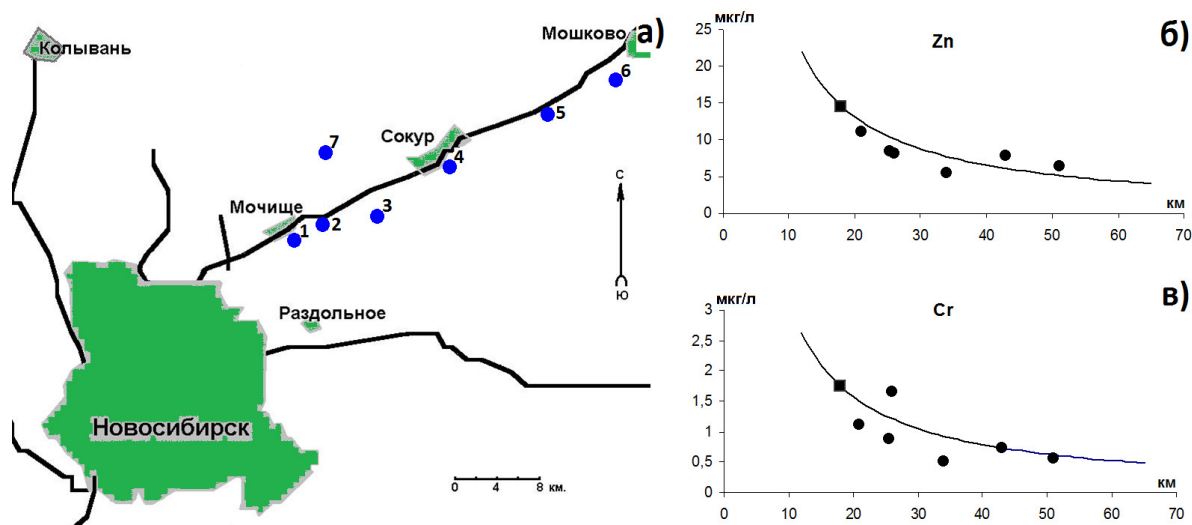


Рис. 1: Схема отбора проб снега (а). Измеренные и восстановленные по модели (б) выпадения цинка (б), хрома (в) в направлении на северо-восток от г. Новосибирска. ■ — опорная точка, ● — контрольные точки наблюдений

3 Анализ функциональных связей

С использованием спутниковых снимков проведём количественное исследование ореолов загрязнения снежного покрова в окрестностях крупных промышленных предприятий Сибири: Норильского асфальто-бетонного завода и Искитимского цементного завода (Новосибирская обл.). Для этой цели спутниковые снимки на рис. 2а и рис. 3а были проиндексированы с помощью дискретной шкалы оттенков серого цвета по направлениям доминирующих выносов примесей.

Изучение рис. 2б и рис. 3б показало, что в ближней зоне выпадений примесей в значительной степени проявляются локальные особенности их распространения, обусловленные высотами источников, дисперсным составом, текущими метеорологическими условиями и т.д. Начиная же примерно с 4-х км и далее изменения интенсивности тонов происходит монотонным образом. Дальнейший анализ снимков на рис. 2, 3 с использованием модели (4) позволил выявить наличие функциональных связей между изменениями тонов серого цвета по мере удаления от источников и динамикой уменьшения концентраций примесей (рис. 2в, 3в). Как показало численное исследование, вполне удовлетворительное их описание может быть достигнуто с помощью логарифмической аппроксимации рассматриваемых рядов данных.

Заключение

С использованием уравнения баланса лёгкой примеси в пограничном слое атмосферы на основе асимптотик его решений построены экономичные по числу опорных точек модели реконструкции регионального загрязнения территорий сосредоточенными и площадными источниками. Проведена апробация разработанных моделей на данных натурных исследований аэрозольного загрязнения снежного покрова в окрестностях Новосибирска, а также ряда крупных промышленных предприятий Сибири.

Выявлены устойчивые количественные закономерности между полями выпадения взвешенных веществ и интенсивностью изменения тонов серого цвета на космических снимках в радиальных направлениях от промышленных источников. Для этой цели очаги загрязнения от этих источников были проиндексированы с помощью дискретной шкалы оттенков серого цвета по направлениям доминирующих выносов примесей. Установлено, что для загрязнений регионального масштаба между этими полями характерной является функциональная связь, выражаемая логарифмической зависимостью.

Полученные зависимости позволяют существенно снизить затраты на проведение наземных мониторинговых исследований загрязнения территорий в окрестностях городов и промышленных предприятий. По ограниченному числу опорных точек наблюдений может быть проведена пространственная реконструкция полей выпадений, выполнена оценка суммарных выбросов примесей.

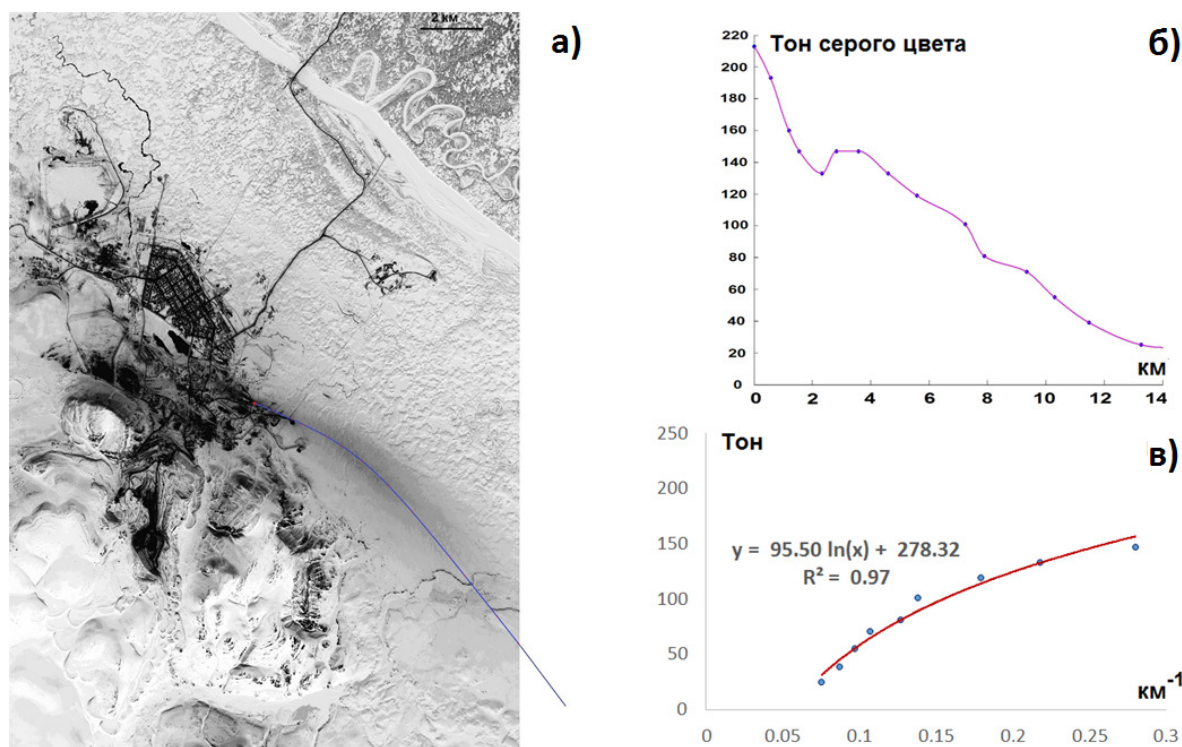


Рис. 2: Спутниковый снимок Норильска (4.05.2004) (а). Изменения тонов серого цвета снежного покрова в юго-восточном направлении выноса пыли от асфальто-бетонного завода (б). Функциональная связь (в)

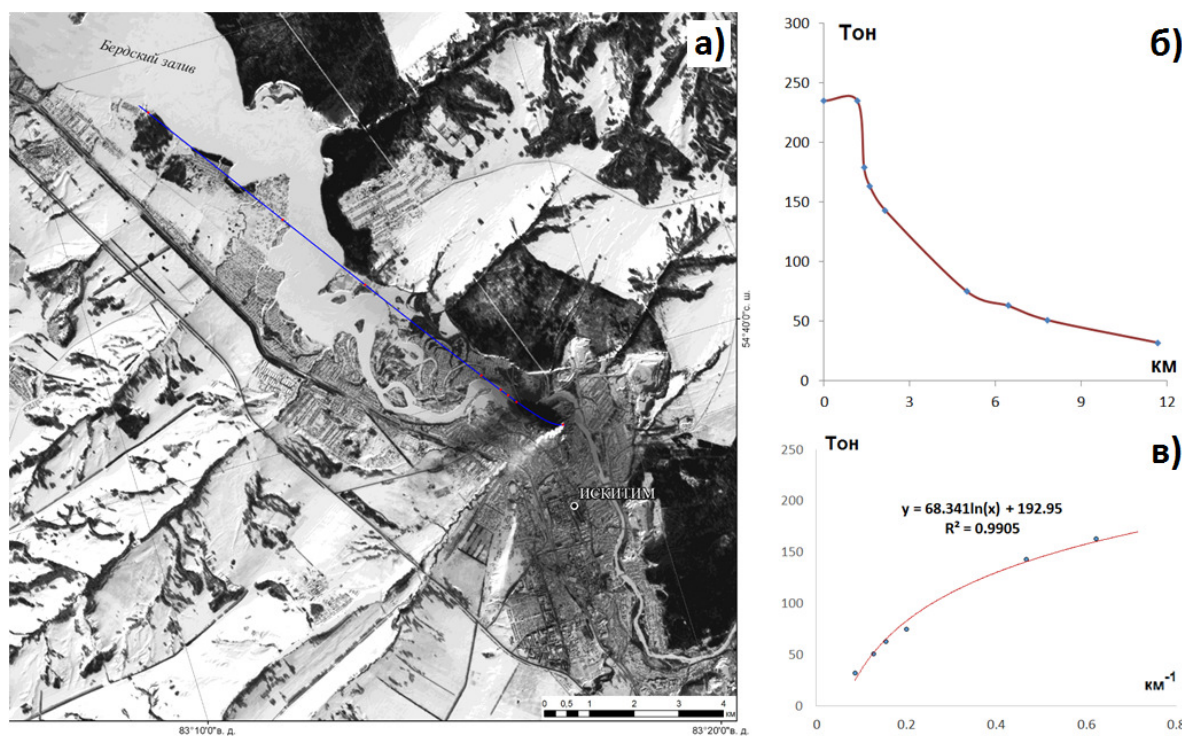


Рис. 3: Спутниковый снимок г. Искитима (7.02.2014) (а). Изменения тонов серого цвета снежного покрова (б) и функциональная связь (в) в северо-западном направлении выноса пыли от цементного завода

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 18.

Список литературы

- [1] Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 279 с.
- [2] Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф.Т.М. Ньистада и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 351 с.
- [3] Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
- [4] Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 182 с.
- [5] Прокачева В.Г., Усачёв В.Ф. Снежный покров в сфере влияния города. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 176 с.
- [6] Бортникова С.Б., Рапута В.Ф., Девятова А.Ю., Юдахин Ф.Н. Методы анализа данных загрязнения снегового покрова в зонах влияния промышленных предприятий (на примере г. Новосибирска) // Геоэкология. 2009. № 6. С. 515–525.
- [7] Онучин А.А., Буренина Т.А., Зубарева О.Н., Трефилова О.В., Данилова И.В. Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района // Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 1025–1037.
- [8] Василевич М.И., Шапов В.М., Василевич Р.С. Применение спутниковых методов исследования при оценке загрязнения снежного покрова вокруг промышленных предприятий в тундровой зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 50–60.
- [9] Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Снежный покров как индикатор кумулятивного техногенного загрязнения в сфере влияния городов и дорог // Метеорология и гидрология. 2013. № 3. С. 94–106.
- [10] Дмитриев А.В., Дмитриев В.В. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса таяния снежного покрова в районе г. Омска по материалам 2007–2009 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 34–41.
- [11] Камынин Л.И. Курс математического анализа. М.: Изд-во МГУ, 1995. Т. 2. 624 с.
- [12] Рапута В.Ф., Олькин С.Е., Резникова И.К. Методы численного анализа данных наблюдений регионального загрязнения территорий площадным источником // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 558–562.

*Владимир Федотович Рапута — д.ф.-м.н., гл. науч. сотр.
Института вычислительной математики и
математической геофизики СО РАН;
e-mail: raputa@sscc.ru;*

*Татьяна Владимировна Ярославцева — к.т.н., ст. науч. сотр.
Новосибирского НИИ гигиены Роспотребнадзора;
e-mail: tani-ta@list.ru.*

Дата поступления — 3 мая 2017 г.