

В.Ф. Рапута

Модели реконструкции полей длительных выпадений аэрозольных примесей

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 28.01.2005 г.

Проведено построение малопараметрических моделей оценивания локального и регионального загрязнений местности аэрозольными источниками. Используются свойства подобия процессов распространения примеси и статистических характеристик ветрового и турбулентного режима в приземном и пограничном слоях атмосферы. Апробация моделей проведена на данных экспедиционных исследований загрязнения снежного покрова тяжелыми металлами в окрестностях Норильского медеплавильного завода.

Введение

В условиях постоянного роста антропогенных воздействий на окружающую среду желательно располагать разнообразными и детальными сведениями о ее фактическом состоянии. При организации сети наблюдений необходимо использовать данные о существующих и планируемых источниках загрязнения атмосферы, характеристиках загрязняющих веществ, гидрометеорологических и климатических условиях, результатах прошлых наблюдений, а также информацию о дальнем переносе примесей.

К настоящему времени более обстоятельно разработаны теория и методы расчета полей разовых (в основном 20–30 мин) концентраций [1, 2]. Для определения полей среднесезонных, среднегодовых концентраций на основе разовых концентраций необходима существенно большего объема детальная информация о параметрах атмосферной диффузии, метеоусловиях, внутригодовом объеме выбросов от источника, дисперсном составе и трансформации примесей и т.д. Именно поэтому в большей части работ по расчету среднегодовых концентраций ограничиваются их грубой оценкой или учетом только отдельных метеорологических факторов. В наиболее полных схемах необходимо использование при расчетах многомерных выборочных функций распределения, которые по данным метеонаблюдений определяются с малой обеспеченностью [3].

1. Реконструкция локального загрязнения местности

В основе моделей оценивания длительного аэрозольного загрязнения местности точечными и распределенными источниками положено следующее соотношение [3]:

$$\bar{q}_{\bar{\tau}} = \int_0^{\infty} q \rho_{\tau, \bar{\tau}}(q) dq, \quad (1)$$

выражающее связь между средней концентрацией $\bar{q}_{\bar{\tau}}$ за длительный период (сезон, год), относящейся к интервалу времени $\bar{\tau}$, и q — разовыми концентрациями, относящимися к интервалу времени $\tau \ll \bar{\tau}$; $\rho_{\tau, \bar{\tau}}$ — плотность вероятности для разовых концентраций. Значение q находится на основании решения уравнения турбулентной диффузии.

При расчете средней концентрации в приземном слое атмосферы определяющее значение имеют часто встречающиеся метеорологические условия. К ним относятся так называемые нормальные метеоусловия, для которых справедлива следующая степенная аппроксимация скорости ветра и коэффициента вертикального турбулентного обмена [1, 2]:

$$u(z) = u_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^n; \quad K_z = k_1 \frac{z}{z_1}, \quad (2)$$

где u_1 и k_1 — значения u и K_z при $z = z_1$.

В этом случае для точечного источника получаем следующее представление для средней приземной концентрации:

$$\bar{q}(r, \varphi) = \iint_{\Omega} q(r, \varphi, k_1, u_1) p_1(k_1, u_1) dk_1 du_1, \quad (3)$$

где r, φ — полярные координаты; $p_1(k_1, u_1)$ — совместная плотность вероятности u_1 и k_1 за период усреднения; Ω — область реального изменения u_1 и k_1 ;

$$q(r, \varphi, k_1, u_1) = \frac{P(\varphi + 180^\circ) q_\lambda(r, k_1, u_1)}{r}. \quad (4)$$

Здесь $P(\varphi)$ — приземная роза ветров; q_λ — разовая концентрация для линейного источника.

Использование степенной аппроксимации (2) скорости ветра и коэффициента турбулентного обмена позволяет для легкой примеси представить $q_\lambda(r, k_1, u_1)$ в аналитической форме

$$q_\lambda = \frac{Q}{r(1+n)k_1\varphi_0\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{u_1 H^{1+n}}{k_1(1+n)^2 r}\right], \quad (5)$$

где Q , H – мощность и высота источника; φ_0 – дисперсия скорости ветра.

Для монодисперсной примеси концентрация q_w определяется соотношением

$$q_w = q_\lambda \chi\left(\frac{k_1 r}{u_1}, \frac{w}{k_1}, H\right); \quad \chi = \frac{\left[\frac{u_1}{(1+n)^2 k_1}\right]^\omega H^{(1+n)\omega}}{\Gamma(1+\omega)r^\omega}, \quad (6)$$

где $\omega = w/[(1+n)k_1]$; $\Gamma(1+\omega)$ – гамма-функция.

Климатологический анализ данных градиентных наблюдений на сети теплосбалансовых станций позволяет установить более детально структуру и свойства функции $p_1(k_1, u_1)$. Имеет место представление [3]:

$$p_1(k_1, u_1) = p'(u_1)p''(\lambda), \quad (7)$$

где $\lambda = k_1/u_1$; p' , p'' – одномерные плотности вероятности величин u_1 , λ за период усреднения.

В первом приближении можно принять, что

$$p''(\lambda) = \delta(\lambda - \bar{\lambda}), \quad (8)$$

где $\delta(\lambda)$ – дельта-функция.

Для более полного учета параметра устойчивости λ функция $p''(\lambda)$ может быть задана в виде гамма-распределения Вейбулла [3]:

$$p''(\lambda) = \frac{\alpha^{K-1} \lambda^{-K}}{\Gamma(K-1)} e^{-\alpha/\lambda}. \quad (9)$$

Для случая легкой примеси с учетом (4), (5), (7), (8) из соотношения (3) вытекает

$$\begin{aligned} \bar{q}(r, \varphi) &= \frac{QP(\varphi + 180^\circ)}{\sqrt{2\pi}\varphi_0 r^2} \times \\ &\times \iint_{\Omega} \frac{1}{n+1} \exp\left[-\frac{H^{n+1}}{\lambda(1+n)^2 r}\right] \lambda p'(u_1) p''(\lambda) d\lambda du_1 = \\ &= \frac{QP(\varphi + 180^\circ)\bar{\lambda}}{\sqrt{2\pi}(1+n)\varphi_0 r^2} \exp\left[-\frac{H^{n+1}}{\bar{\lambda}(1+n)^2 r}\right] \int_0^u p'(u_1) du_1 = \\ &= \theta_1 \frac{P(\varphi + 180^\circ)}{r^2} e^{-\theta_2/r}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\theta_1 = \frac{Q\bar{\lambda}}{\sqrt{2\pi}(1+n)\varphi_0} \int_0^u p'(u_1) du_1, \quad \theta_2 = \frac{H^{1+n}}{\bar{\lambda}(1+n)^2}. \quad (11)$$

При наличии данных наблюдений концентрации примеси параметры θ_1 , θ_2 определяются методом наименьших квадратов.

Рассмотрим случай монодисперсной примеси. В переменных u_1 , λ функция χ примет вид

$$\chi = \frac{H^{(1+n)\omega_1}}{[(1+n)^2 \bar{\lambda}]^{\omega_1} \Gamma(1+\omega_1) r^{\omega_1}}, \quad (12)$$

где $\omega_1 = w/[(1+n)\bar{\lambda}u_1]$.

Из соотношения (3), с учетом (4)–(8), следует

$$\begin{aligned} \bar{q}_w(r, \varphi) &= \frac{QP(\varphi + 180^\circ)\bar{\lambda}}{\sqrt{2\pi}\varphi_0(1+n)r^2} \exp\left[-\frac{H^{n+1}}{\bar{\lambda}(1+n)^2 r}\right] \times \\ &\times \int_0^u p'(u_1) \frac{H^{(1+n)\bar{\omega}_1} r^{-\bar{\omega}_1}}{[(1+n)^2 \bar{\lambda}]^{\bar{\omega}_1} \Gamma(1+\bar{\omega}_1)} du_1, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\bar{\omega}_1 = w/[(1+n)\bar{\lambda}u_1]$.

Учитывая аналогичное свойство (8) для функции $p'(u_1)$, из (13) получаем следующее регрессионное соотношение:

$$q_w(r, \varphi) = \theta_{1w} P(\varphi + 180^\circ) r^{\theta_{3w}} e^{-\theta_2/r}, \quad (14)$$

где

$$\theta_{1w} = \frac{QH^{(1+n)\omega_2}}{\sqrt{2\pi}\varphi_0(1+n)^{2\omega_2+1} \bar{\lambda}^{\omega_2-1} \Gamma(1+\omega_2)},$$

$$\theta_{3w} = -2 - \omega_2, \quad \omega_2 = w/[(1+n)\bar{\lambda}_1 \bar{u}_1].$$

Для оценки параметров θ_{1w} , θ_2 , θ_{3w} в регрессии (14) необходимо проведение наблюдений не менее чем в трех точках местности. Количество точек может быть уменьшено, если оценка θ_2 проведена предварительно для рассматриваемого источника в случае слабооседающей примеси. Параметр θ_2 в некотором смысле является внешним параметром, и его предварительную оценку можно выполнить, исходя из геометрической высоты источника и динамических и тепловых характеристик выбрасываемой газовой смеси.

Замечание 1. Построение регрессионной зависимости для оценивания поля концентрации монодисперсной примеси можно провести без априорных предположений о виде функции $p'(u_1)$, используя метод асимптотических разложений. Для этого функцию $r^{-\bar{\omega}_1}$ представим в виде ряда по степеням $\ln r$:

$$r^{-\bar{\omega}_1} = e^{-\bar{\omega}_1 \ln r} \approx 1 - \bar{\omega}_1 \ln r + \frac{\bar{\omega}_1^2 \ln^2 r}{2!}. \quad (15)$$

Для малых скоростей оседания аэрозольных частиц можно ограничиться первыми членами разложения (15). Например, для первых двух членов разложения получим следующую регрессионную зависимость:

$$\bar{q}_w(r, \varphi) = \frac{\theta'_{1w} + \theta'_{3w} \ln r}{r^2} e^{-\theta_2/r} P(\varphi + 180^\circ), \quad (16)$$

где

$$\theta'_{1w} = \frac{Q\bar{\lambda}}{\sqrt{2\pi\phi_0(1+n)}} \int_0^u p'(u_1) \frac{H^{(1+n)\bar{\omega}_1}}{[(1+n)^2\bar{\lambda}]^{\bar{\omega}_1} \Gamma(1+\bar{\omega}_1)} du_1,$$

$$\theta'_{3w} = \frac{-Q\bar{\lambda}}{\sqrt{2\pi\phi_0(1+n)}} \int_0^u p'(u_1) \frac{H^{(1+n)\bar{\omega}_1} \bar{\omega}_1}{[(1+n)^2\bar{\lambda}]^{\bar{\omega}_1} \Gamma(1+\bar{\omega}_1)} du_1.$$

Замечание 2. Для полидисперсной примеси задача оценивания полей средних концентраций не слишком усложняется, если известна функция распределения скоростей оседания примеси, выбрасываемой из аэрозольного источника. Представляя функцию распределения $R(w)$ дискретным образом как N фракций со средними скоростями оседания w_i и весами ρ_i , $i = \overline{1, N}$, запишем задачу определения поля длительных аэрозольных выпадений в виде [4, 5]:

$$\bar{q}_w(r, \varphi) = \frac{\bar{\theta}_1}{r^2} e^{-\theta_2/r} P(\varphi + 180^\circ) \sum_{i=1}^N \rho_i \frac{\theta_2^{w_i \bar{\theta}_3}}{\Gamma(1 + w_i \bar{\theta}_3)} r^{-w_i \bar{\theta}_3}, \quad (17)$$

где

$$\bar{\theta}_1 = \frac{Q\bar{\lambda}}{\sqrt{2\pi\phi_0(1+n)}}, \quad \bar{\theta}_3 = \frac{1}{(1+n)\bar{\lambda}\bar{u}_1}.$$

При неизвестной функции распределения $R(w)$ размерность задачи оценивания $\bar{q}_w(r, \varphi)$ на основе (17) существенно возрастает, если дополнительно в число неизвестных параметров ввести веса ρ_i , $i = \overline{1, N}$. При небольших N решение этой задачи не потребует слишком большого объема экспериментальной информации о полях концентраций аэрозольных примесей. Более реальным представляется метод оценивания, основанный на априорном задании $R(w)$, зависящей от небольшого числа параметров.

Для опосредованного учета специфики полидисперсности примеси достаточно эффективным является также способ, основанный на выделении различных зон выпадения аэрозолей в зависимости от расстояния до источника. В этом случае в пределах выделенной зоны примесь предполагается монодисперсной и локальное оценивание параметров модели (14) проводится с использованием данных наблюдений из этой зоны [6–8]. Предлагаемый метод следует применять при наличии достаточно большого количества точек наблюдений.

2. Восстановление регионального аэрозольного загрязнения

Поле осредненной за длительный промежуток времени концентрации от точечного источника определяется по формуле [6]:

$$\bar{q}(r, \varphi, z) = \frac{S(r, z)g(\varphi)}{2\sqrt{\pi k_0 r}} \int_{-\Delta}^{\Delta} \exp\left[-\frac{r \sin^2 \psi}{4k_0}\right] d\psi, \quad (18)$$

где r, φ – полярные координаты расчетной точки с началом в месте расположения источника; $g(\varphi)$ – вероятность противоположного φ направления ветра; Δ – некоторый малый угол, характеризующий расширение факела в поперечном к ветру направлении; $S(r, z)$ – решение полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии в пограничном слое атмосферы [1, 2].

Для типичных $k_0 = 0,5–1$ м, $\Delta < 10^\circ–15^\circ$ при $r > 1$ км

$$\bar{q}(r, \varphi, z) = FS(r, z)g(\varphi)/r. \quad (19)$$

Здесь F – величина, практически не зависящая от r .

Соотношение (18) допускает дальнейшие упрощения для слабооседающей и инертной примеси. В этом случае при удалении от источника примеси на расстояние порядка 7–10 км функция $S(r, z)$ практически не зависит от z . Тогда с учетом (19) для плотности выпадений примеси на подстилающую поверхность получим

$$P(r, \varphi) = \theta g(\varphi)/r, \quad (20)$$

где $\theta = \beta Q / (2\pi h)$, β – коэффициент взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью; u, h – скорость ветра и толщина слоя перемешивания.

Замечание 3. Следует отметить, что для решения рассматриваемых задач оценивания полей концентраций примесей весьма существенными условиями являются оптимальное размещение точек отбора проб либо выбор наиболее информативной части данных наблюдений [9]. Выполнение этих условий позволяет снизить влияние погрешностей измерений на точность оценивания параметров. Методы и алгоритмы построения оптимальных планов, а также численный анализ чувствительности моделей оценивания для конкретных газоаэрозольных источников и планов наблюдений содержатся в работах [4, 5, 10, 11].

3. Анализ загрязнения местности выбросами Норильского медеплавильного завода

Атмосферные промышленные выбросы являются основным источником загрязнения природной среды Норильского промышленного района. Около 70% выбросов приходится на металлургическое производство [12]. Масса пылевых выбросов превышает 30 тыс. т в год. Загрязнение снежного покрова пылью приводит к изменению его альбедо и яркостных характеристик, в результате чего ореолы загрязнения достаточно четко фиксируются на космических снимках. Их протяженность достигает 100 км [13]. Химический состав твердого осадка снеговой воды характеризуется содержанием таких

тяжелых металлов, как железо, медь, никель, марганец, хром, цинк, свинец, кадмий [14].

На данных экспедиционных исследований загрязнения снежного покрова [14], выполненных в окрестности Норильского медеплавильного завода, проведем апробацию предложенных выше методов оценивания аэрозольного загрязнения местно-

сти. Для реконструкции полей аэрозольных выпадений в ближней зоне использовалась локальная модель (14). Оценивание выпадений в дальней зоне (более 10 км) проводилось по модели (20). Результаты численного восстановления содержания в снеге тяжелых металлов вдоль маршрута отбора проб в окрестностях завода представлены на рис. 1–3.

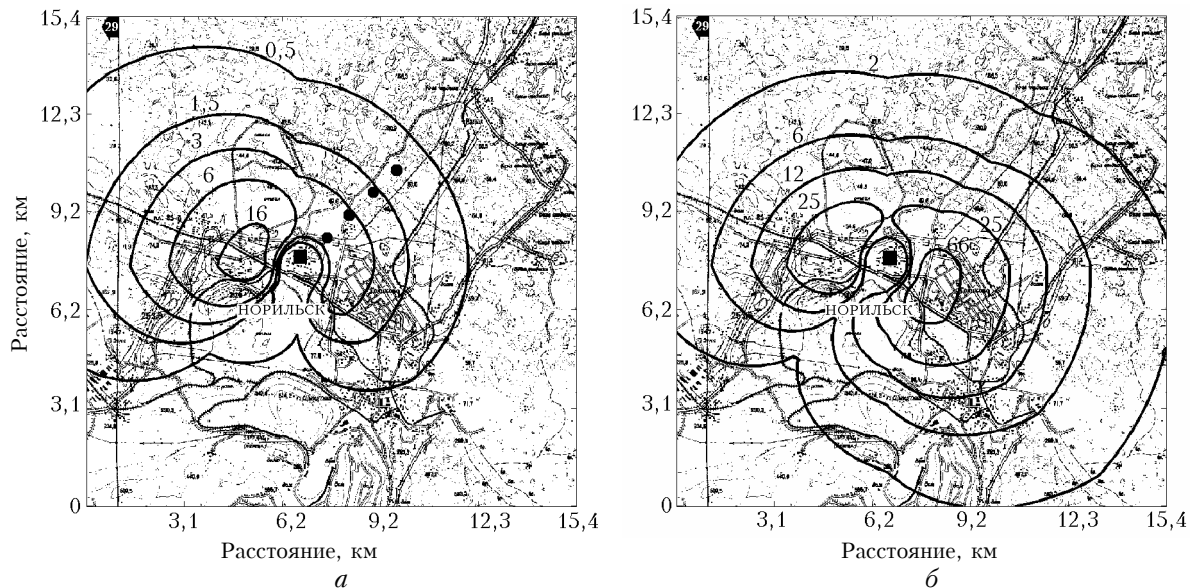


Рис. 1. Восстановленные поля аэрозольных выпадений никеля от Норильского медеплавильного завода: *a* — для зимнего периода (мг/л); *б* — для летнего сезона (в % от максимального значения). ■ — источник выброса, ● — точки отбора проб снега

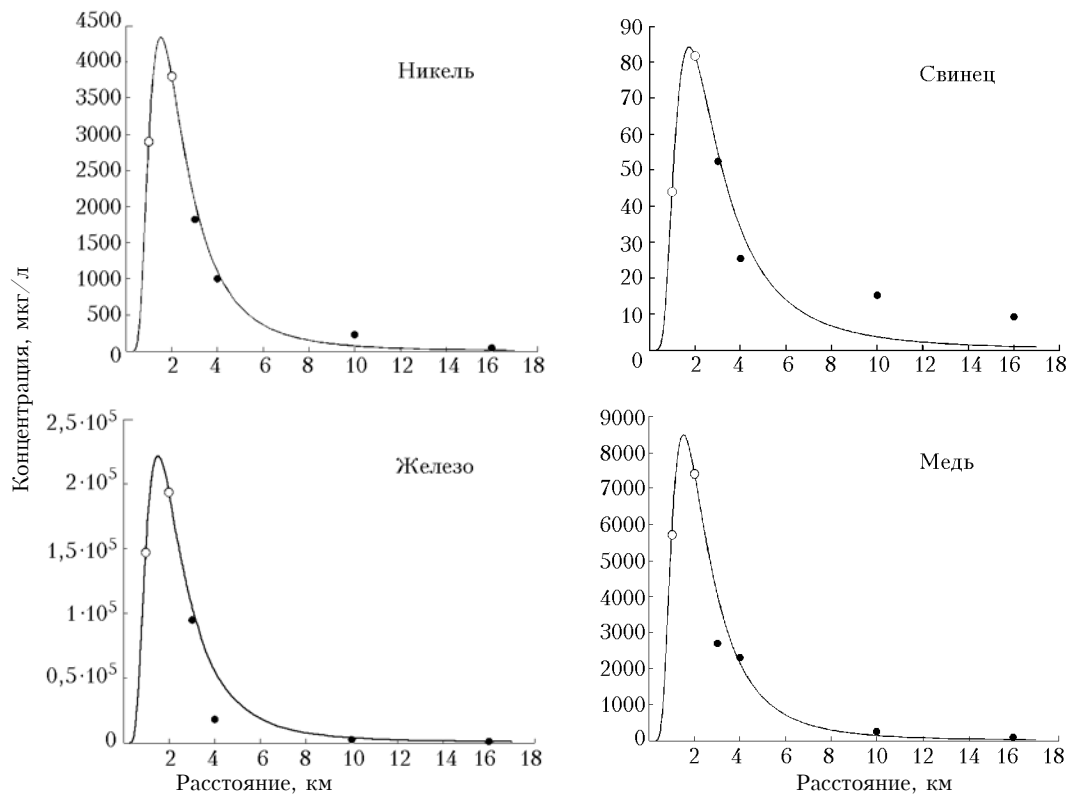


Рис. 2. Содержание тяжелых металлов в твердом осадке снеговой воды в направлении на северо-восток от Норильского медеплавильного завода. Восстановленные концентрации никеля, свинца, железа, меди по локальной модели: ○ — опорные точки; ● — контрольные точки наблюдений; — — рассчитанная концентрация

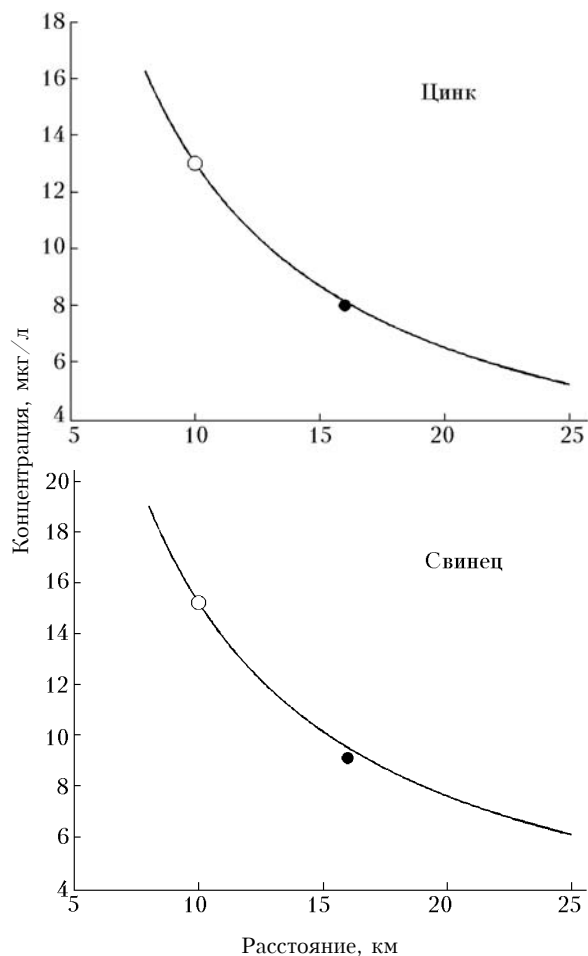


Рис. 3. Содержание цинка, свинца, восстановленное по модели регионального переноса (20)

Следует отметить, что объем данных наблюдений (см. рис. 3) не достаточен для оценки эффективности модели регионального переноса (20). В рассматриваемом случае близость данных наблюдений расчетной кривой показывает количественную тенденцию изменения концентрации на больших удалениях от медеплавильного завода. Для более полного подтверждения этой закономерности необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований. Более полное экспериментальное подтверждение модели (20) для точечных и площадных источников приводится в работах [8, 15].

Результаты численного моделирования подтверждают достаточно высокий уровень соответствия измеренных и вычисленных концентраций. Выпадение тяжелых металлов на ближних расстояниях представлено в основном крупными аэрозольными фракциями, в зоне более 10 км тяжелые металлы переносятся на слабооседающих аэрозольных частицах. Анализ рис. 1 показывает, что территория г. Норильска подвержена интенсивному загрязнению аэрозольными выбросами медеплавильного завода в различные сезоны года. Следует также отметить крайне неудачное взаимное расположение города и завода.

Заключение

Теоретическое исследование и анализ на его основе данных натуральных наблюдений показывают возможность вполне адекватного описания полей длительного загрязнения местности в рамках достаточно простых регрессионных зависимостей. Процедура агрегирования неизвестных величин существенно повышает эффективность решения обратных задач переноса примесей. При наличии весьма ограниченной входной информации построены количественные модели формирования полей длительных аэрозольных выпадений примеси в окрестности конкретного техногенного источника.

Полученные количественные закономерности аэрозольного загрязнения в окрестности техногенного источника могут быть использованы для установления связей с яркими характеристиками снегового покрова при анализе данных дистанционного зондирования поверхности Земли в видимом диапазоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 13.6; РФФИ-ОБЪ, грант 05-05-98006.

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.
2. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примесей. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 279 с.
3. Берлянд М.Е., Генихович Е.Л., Канчан Я.С., Онискул Р.И., Чичерин С.С. О расчете среднегодовых концентраций примеси в атмосфере от промышленных источников // Тр. ГО. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. Вып. 417. С. 3–18.
4. Крылова А.И., Рапута В.Ф. Обратная задача восстановления плотности осадка препарата при аэрозольных обработках сельскохозяйственных культур. Препр. / ВЦ СО РАН (Новосибирск). 1993. № 995. 18 с.
5. Крылова А.И., Рапута В.Ф., Суторихин И.А. Планирование и анализ подфакельных наблюдений концентрации примеси в атмосфере // Метеорол. и гидрол. 1993. № 5. С. 5–13.
6. Рапута В.Ф., Садовский А.П., Олькин С.Е. Реконструкция выпадений бенз(а)пирена в окрестностях Новосибирского электродного завода // Метеорол. и гидрол. 1997. № 2. С. 33–41.
7. Рапута В.Ф., Шуваева О.В., Коковкин В.В., Шурхунин С.Г., Воробьева О.А. Анализ аэрозольного загрязнения в районе Новосибирского оловокомбината // Химия в интересах устойчивого развития. 2002. Т. 10. С. 691–697.
8. 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 атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 546–551.
9. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1971. 312 с.
10. 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.
11. *Рапута В.Ф., Крылова А.И.* Обратная задача получения оценок параметров источника примеси в пограничном слое атмосферы // Метеорол. и гидрол. 1995. № 3. С. 49–58.
12. *Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В.* Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 255 с.
13. *Харук В.И., Винтербергер К., Цибульский Г.М., Яхимович А.П.* Анализ техногенной деградации при-
тундровых лесов по данным съемки из космоса // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 4. С. 91–97.
14. *Игамбердиев В.М., Терешенков О.М., Кутыев Х.А., Попова Е.Н.* Оценка современного состояния природной среды: Норильский промышленный район // Народное хозяйство республики Коми. Сыктывкар, 1994. Т. 3. С. 54–61.
15. *Рапута В.Ф., Королева Г.П., Гориков 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.

V.F. Raputa. The models for reconstruction of fields of prolonged of fall-outs aerosol pollutions.

Low-parameters models for estimation of the local and region pollution of the environment by aerosol sources are developed. Similarity properties of the processes of admixture dissipation and statistic characteristics (parameters) for wind and turbulent regimes inside surface and boundary air was used. The models were approved on expedition data on snow blanket pollution by heavy metals round the Norilsk copper-smelting plant.