

В.Ф. Рапута<sup>1</sup>, А.А. Айриянц<sup>2</sup>, С.Б. Бортникова<sup>2</sup>, И.А. Суторихин<sup>3</sup>

## Закономерности пылевого загрязнения окрестностей хвостохранилищ

<sup>1</sup> *Институт вычислительной математики и математической геофизики,*

<sup>2</sup> *Институт геологии Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск*

<sup>3</sup> *Институт водных и экологических проблем, г. Барнаул*

Поступила в редакцию 27.11.2001 г.

Предложена модель оценки локального пылевого загрязнения местности площадными источниками. Проведена ее апробация по данным маршрутных наблюдений массовой концентрации пыли в районе оз. Селитренное Алтайского края и опробования почв на содержание тяжелых металлов вблизи хвостохранилища Салагаевский Лог (г. Салаир, Кемеровская обл.).

### Введение

Традиционные задачи переноса и диффузии аэрозольных примесей связаны с описанием процесса их распространения от точечных или распределенных источников, расположенных в пограничном слое атмосферы [1–3]. В таких задачах режим работы источников задается. Ситуация существенно меняется в случае, когда источником примеси является подстилающая поверхность. Тогда ветровой подхват примеси и ее дальнейший перенос будут в значительной степени зависеть от состояния этой поверхности (влажности, гранулометрического состава, прочности сорбции примеси на подстилающей поверхности и т.д.). Решение задачи ветровой миграции в общей постановке представляет большие затруднения. Определенный прогресс имеется в описании процессов переноса песка при пылевых бурях [4, 5], однако остается открытым вопрос об определении количества поднятой пыли. На практике эта неопределенность обычно решается эмпирически, путем введения коэффициента ветрового подхвата, характеризующего отношение концентрации примеси в воздухе к поверхностной концентрации на почве [6].

Мощными источниками пыли, тяжелых металлов и других примесей являются некультивируемые хвостохранилища, в которых в огромных количествах накоплены продукты переработки горно-обогатительной промышленности [7, 8]. К другим источникам интенсивного выноса пыли следует отнести пересыхающие соляные озера. Экспериментальные исследования показывают, что эоловый снос вещества в сухую погоду с поверхности этих объектов является доминирующим механизмом поступления вредных примесей в окружающую среду, вызывающим обширное влияние на загрязнение прилегающих земель и атмосферы. Представляет интерес количественное

изучение процессов как разового, так и длительного загрязнений.

В качестве объектов исследования в статье рассматриваются действующее хвостохранилище Салагаевский Лог Салаирского горно-обогатительного комбината (г. Салаир, Кемеровская обл.) и Селитренное озеро (Благовещенский район, Алтайский край).

### Постановка обратной задачи

Анализ имеющихся экспериментальных данных о концентрации вредных веществ в воздухе и почве, системе наблюдений, пространственно-временной структуре рассматриваемых источников, метеорологических и климатических условиях показывает, что интерпретацию протекающих процессов разового и длительного аэрозольных загрязнений местности удобно провести в рамках постановок обратных задач переноса примеси [9, 10]. На это указывают наличие маршрутных наблюдений, удобная поверхностная ориентация источников пыли по отношению к господствующим для данной местности направлениям ветра. На рис. 1 показаны конфигурация источников и схемы маршрутов отбора проб воздуха и почв.

Данная информация позволяет использовать для описания процессов переноса пыли от площадного источника суперпозицию полей концентрации от набора линейных источников, расположенных в поперечном к ветру направлении. Тогда концентрацию  $q_c(r)$  на расстоянии  $r$  от площадного источника можно вычислить по формуле

$$q_c(r) = \int_0^L q_\lambda(r+L-\eta)d\eta, \quad (1)$$

где  $r$  ориентировано по направлению ветра;  $L$  – эффективная ширина площадного источника в направлении

ветра;  $q_i(x)$  – концентрация от линейного источника. На данном этапе исследования  $q_i(x)$  удобнее представить в аналитическом виде [2, 3]:

$$q_c(r) = \frac{ML}{K_1(1+n)(r+L-\lambda)^\omega} \exp\left(-\frac{r_m}{r+L-\lambda}\right), \quad (4)$$

где  $\lambda \in [0, L]$ .

Проводя процедуру агрегирования параметров в (4), приходим к выражению

$$q_c(r, \Theta) = \frac{\Theta_1}{(r + \Theta_2)^{\Theta_3}} \exp[-\Theta_4 / (r + \Theta_2)]. \quad (5)$$

Здесь

$$\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4), \quad \Theta_1 = \frac{ML}{K_1(1+n)},$$

$$\Theta_2 = L - \lambda, \quad \Theta_3 = \omega, \quad \Theta_4 = r_m.$$

В общем случае оценивание вектора параметров  $\Theta$  можно провести по методу наименьших квадратов с использованием процедур последовательного анализа и планирования эксперимента [11, 12]. При определенных предположениях выражение (5) можно упростить. В частности, для легких фракций пыли при малой высоте взметывания и сравнительно больших  $r$  и  $\Theta_2$  получим

$$q_c(r, \Theta_1, \Theta_2) = \Theta_1 / (r + \Theta_2). \quad (6)$$

На больших расстояниях от площадного источника зависимость от  $\Theta_2$  становится слабой. В результате будем иметь

$$q_c(r, \Theta) = \Theta / r. \quad (7)$$

## Селитренное озеро

Селитренное озеро находится на расстоянии около 3 км к северо-востоку от оз. Кучукского. Озеро используется для промышленной добычи сульфата натрия и в засушливый период является мощным источником мелкодисперсной пыли. Площадь пыления может составлять около 6–9 км<sup>2</sup>. Озеро вытянуто с юго-восточного на северо-западное направление, что при доминирующем направлении ветра позволяет применить для описания поля концентрации пыли регрессионные зависимости типа (5) – (7). Отбор пыли на фильтры последовательно проводился в пяти пунктах 27 апреля 1997 г. При проведении наблюдений облачность практически отсутствовала. Время отбора в каждом пункте составляло 30 мин.

Результаты наблюдений приведены в табл. 1. На рис. 1,а представлена схема расположения точек отбора. Анализ табл. 1 и рис. 1,а показывает, что для интерпретации экспериментальных данных может быть использована модель (7). Для оценки параметра  $\Theta$  достаточно использовать одну точку наблюдения. На рис. 2,а приведен результат восстановления приземной концентрации пыли в направлении маршрута пробоотбора. В качестве опорной выбрана точка № 2, которая в данном случае является наиболее информативной.

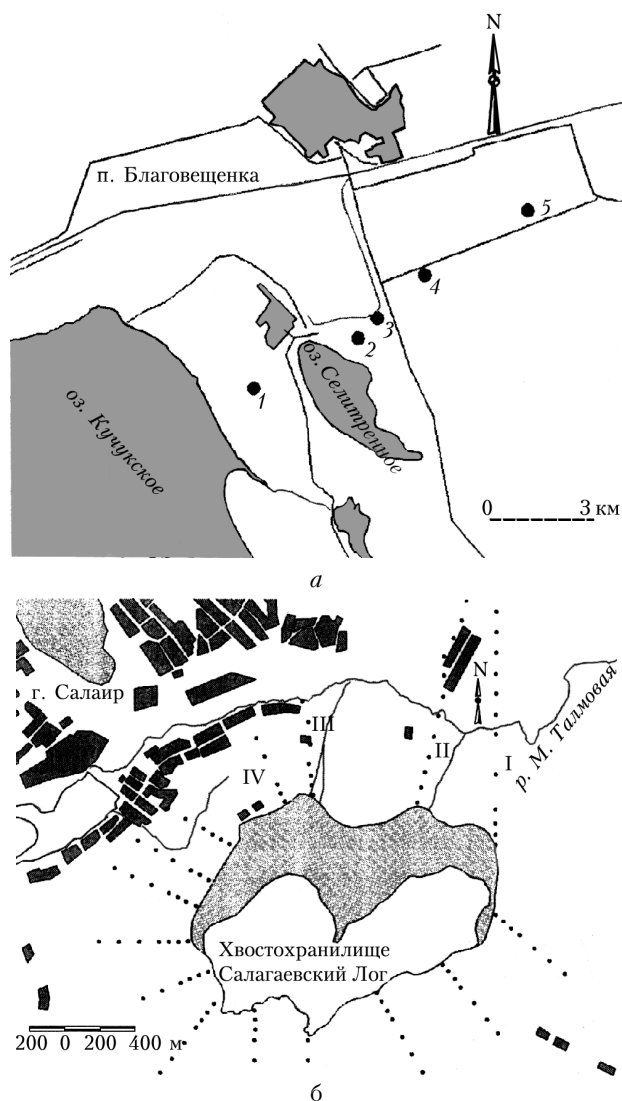


Рис. 1. Схема отбора проб воздуха в районе оз. Селитренное (а) и опробования почв вокруг хвостохранилища Салагаевский Лог (б). 1–5 – точки отбора

$$q_\lambda(x) = \frac{M}{K_1(1+n)x^\omega} \exp\left(-\frac{r_m}{x}\right), \quad (2)$$

где

$$r_m = \frac{u_1 H^{1+n}}{(1+n)^2 K_1}; \quad \omega = 1 + \frac{W}{K_1(1+n)}; \quad (3)$$

$M$  – мощность источника  $K_1$ ;  $u_1$  – коэффициент турбулентного обмена и скорость ветра на высоте 1 м;  $n$  – показатель степени в степенной аппроксимации скорости ветра;  $H$  – высота линейного источника;  $W$  – скорость гравитационного оседания частиц пыли.

Подставляя выражение (2) в (1) и используя теорему о среднем из интегрального исчисления, получаем

Данные экспедиционных исследований в районе оз. Селитренное

Пункт отбора	Время наблюдения (местное)	Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °С	Расстояние от озера, км	Массовая концентрация пыли, мг/м <sup>3</sup>
1	8 ч 30 мин	4 – 6	14	1,5	0,01
2	10 ч 15 мин	6 – 8	14	0,5	0,85
3	11 ч 20 мин	6 – 8	15	1,2	0,32
4	12 ч 30 мин	6 – 8	16	3	0,13
5	14 ч	8 – 10	17	6	0,08

Примечание. Пункт отбора № 1 расположен с наветренной стороны, остальные – с подветренной.

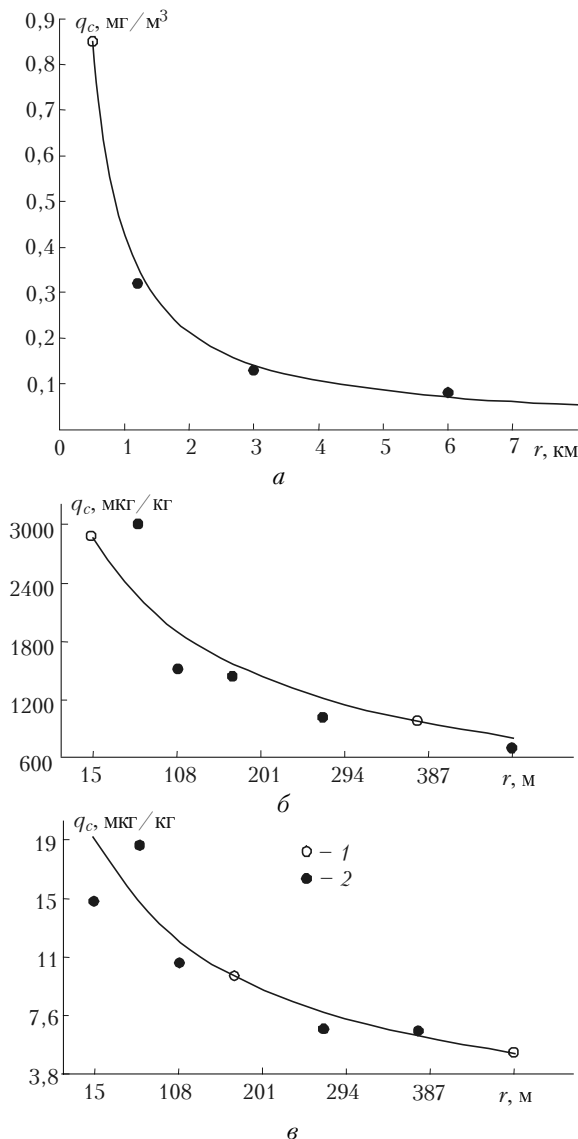


Рис. 2. Массовая концентрация пыли в воздухе (а). Удельное содержание в почве цинка (б) и кадмия (в): измеренные концентрации в опорных (1) и контрольных (2) точках

Сопоставление расчета с наблюдениями в контрольных точках № 3 – 5 показывает достаточно высокий уровень соответствия.

## Хвостохранилище Салагаевский Лог

Хвостохранилище расположено южнее Салаирского рудного поля (г. Салаир, Кемеровская обл.) и размещается в двух естественных логах. У подножья северного склона по долине проходит русло реки М. Талмовой. С южной части хвостохранилища выклинивается естественным склоном, с северной части и флангов ограничено искусственной дамбой высотой до 25–35 м. Размеры его составляют примерно 1500 м в субширотном направлении и 900 м с севера на юг. Общая площадь хвостохранилища 1,17 км<sup>2</sup>. Объем накопленных к 2000 г. отходов – около 20 млн м<sup>3</sup> (35 млн т) [7].

Пробоотбор почв вокруг хвостохранилища был проведен по 15 субрадиальным профилям в полевой сезон 1999 г. Всего было отобрано 108 точечных почвенных проб на площади свыше 3,5 км<sup>2</sup>, в которых инструментальным энергодисперсионным рентгенофлуоресцентным анализом (РФА, исполнитель Ю.П. Колмогоров, ИГ СО РАН) были определены уровни содержания тяжелых металлов (Zn, Pb, Cu, Cd, As, Sb).

Предварительный анализ полученных данных показал, что все аномалии тяжелых металлов в прилегающих почвах сосредоточены к северу и северо-востоку от хвостохранилища, т.е. в соответствии с господствующими направлениями ветров [7].

Если сделать упрощающие предположения, что пылевой снос происходит стационарно с поверхности постоянных размеров, уровень концентрации тяжелых металлов в почве пропорционален концентрации в воздухе, эффективная высота подъема пыли является небольшой (в пределах нескольких метров), а гранулометрический состав пыли представлен преимущественно мелкими фракциями, то в этом случае вполне применима модель (6). Если ограничиться двумя точками наблюдений вдоль одного из профилей, то для оценивания параметров  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  достаточно решить следующую систему уравнений:

$$\Theta_1 / (\Theta_2 + r_i) = y_i, \quad i = 1, 2, \quad (8)$$

где  $r_1, r_2$  – расстояния до границы хвостохранилища ( $r_1 < r_2$ );  $y_1, y_2$  – удельные содержания тяжелого металла в этих точках. Отсюда

$$\Theta_1 = \frac{y_1 y_2 (r_2 - r_1)}{y_1 - y_2}, \quad \Theta_2 = \frac{r_2 y_2 - r_1 y_1}{y_1 - y_2}. \quad (9)$$

На рис. 2, б, в приведены результаты восстановления концентрации Zn и Cd по маршруту № 3. Сравнение данных наблюдений в контрольных точках с расчетом по модели (6) показывает вполне удовлетворительное их согласие. В табл. 2 приведены результаты оценивания параметров  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  по маршруту № 3. Оценки  $\Theta_1$  пропорциональны интенсивности выноса и позволяют найти относительный вклад каждого элемента. Оценки  $\Theta_2$  определяют положение эквивалентного линейного источника относительно ближнего края хвостохранилища. Для Zn, Pb, Sb, As оценки  $\Theta_2$  практически совпадают, что позволяет сделать вывод о подобном характере переноса этих элементов.

Т а б л и ц а 2  
Оценки параметров  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  на маршруте № 3

Элемент	$\Theta_1 \cdot 10^3$	$\Theta_2$
Zn	496	156
Cu	27	361
Pb	156	152
Cd	4	256
Sb	5	197
As	14	204

### Заключение

Проведенное исследование позволило выявить достаточно простые закономерности разового и длительного аэрозольных загрязнений местности площадными источниками. Полученные зависимости показывают, что, несмотря на сложную пространственную и временную структуру рассматриваемых источников, процессы выноса пыли вполне допускают свое количественное описание в рамках стационарных режимов. Переходные нестационарные режимы имеют относительно небольшой вес.

Оценки параметров  $\Theta_1$  с привлечением дополнительной метеорологической информации и результатов теплорасчетных наблюдений дают возможность провести оценку эмиссии пыли при разовом загрязнении приземного и пограничного слоев атмосферы. Оценки  $\Theta_2$  позволяют получить эффективное описа-

ние процессов выноса пыли от площадного источника в приближении линейного источника.

Для получения более универсальных зависимостей дальнейшие исследования количественного описания процессов переноса пыли от площадных источников следует проводить, используя модели загрязнения от точечных источников (по принципу суперпозиций).

Работа проведена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 00-15-98543 и № 01-05-65294) и Интеграционного проекта СО РАН № 64.

1. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.К. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 279 с.
2. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 448 с.
3. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 319 с.
4. Баренблат Г.И., Голицын Г.С. Локальная структура развитых пыльных бурь. М.: Изд-во МГУ, 1973. 44 с.
5. Бютнер Э.К. Динамика приповерхностного слоя воздуха. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 159 с.
6. Трансурановые элементы в окружающей среде // Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1985. 342 с.
7. Айриянц А.А., Бортникова С.Б. Хранилище сульфидсодержащих отходов обогащения как источник тяжелых металлов (Zn, Pb, Cu, Cd) в окружающей среде // Химия в интересах устойчивого развития. 2000. № 8. С. 315–326.
8. Бортникова С.Б., Айриянц А.А., Колонин Г.Р., Лазарева Е.В. Геохимия и минералогия техногенных месторождений Салаирского ГОКа // Геохимия. 1996. № 2. С. 171–185.
9. Рапуна В.Ф., Садовский А.П., Олькин С.Е. Реконструкция выпадения бенз(а)пирена в районе Новосибирского электродного завода // Метеорол. и гидрол. 1997. № 2. С. 33–41.
10. Рапуна 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.
11. Крылова А.И., Рапуна В.Ф., Суторихин И.А. Планирование и анализ подфакельных наблюдений концентрации примеси в атмосфере // Метеорол. и гидрол. 1993. № 5. С. 5–13.
12. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1971. 312 с.

*V.F. Rapuna, A.A. Airiyants, S.B. Bortnikova, I.A. Sutorikhin. Regularities in dust contamination in the vicinity of tailing ponds.*

The model of estimation of local dust contamination from area sources was suggested. The model approbation was conducted by field observation data on mass dust concentration around lake Selitryennoe (Altai region) and soil sampling of heavy metal concentration near Salagaevskii Log tailings ponds (Salair, Kemerovo region).