

# МОДЕЛИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОСЕВОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА\*

В. Ф. РАПУТА

*Институт вычислительной математики и  
математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*  
e-mail: raputa@sscc.ru

Based on semi-empirical equation for turbulent diffusion, the models are constructed for assessment of regional area pollution coming from high-rise aerosol source. An approbation of these models are carried out using observation data obtained near East-Ural radioactive trace that resulted from an explosion of a reservoir containing radioactive waste at MAYAK plant in Chelyabinsk region in 1957. A possibility demonstrated to predict pollution of a pivotal part of trace using estimations obtained.

## Введение

Проблема определения количественных характеристик радиоактивного загрязнения природных сред в результате ядерных взрывов и аварий весьма актуальна. Применение методов прямого моделирования переноса загрязняющих примесей в принципе дает возможность вполне корректно описать поля концентраций радиоактивных загрязняющих веществ, но в ряде случаев этот подход сталкивается со значительными затруднениями. В первую очередь это возможность обеспечения используемых моделей необходимой входной информацией. Существует неопределенность в задании высоты и мощности взрыва, распределении радиоактивных частиц по размерам, определении текущих метеорологических условий. Привлечение же дополнительной экспериментальной информации о полях радиоактивного загрязнения приводит к необходимости создания моделей реконструкции [1, 2]. Принципы построения этих моделей достаточно разнообразны, но в их основе, как правило лежит компромисс между модельными описаниями процессов загрязнения и данными наблюдений [3–5].

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 16.11) и МНТЦ (проект № 2311).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

## 1. Описание радиационной аварии и экспериментальные исследования

В результате технической неисправности 29 сентября 1957 г. на производственном объединении “Маяк” из хранилища отходов в окружающую среду произошел аварийный выброс радиоактивных веществ 20 млн Ки, из которых 18 млн Ки выпало недалеко от места взрыва. Остальная часть — 2 млн Ки, поднявшись на высоту 1–2 км, образовала радиоактивное облако, которое под действием ветра распространялось в северо-восточном направлении. Выпадения из этого облака через 10–11 ч сформировали Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС) в северной части Челябинской, южных районах Свердловской и Тюменской областей. Через 6–8 ч после образования облака оно находилось на расстоянии 350 км и имело плотность загрязнения на оси следа 0.1 Ки/км<sup>2</sup> по <sup>90</sup>Sr [6, 7]. В первые дни после аварии была проведена съемка следа на расстоянии до 350 км от источника загрязнения. Затем картина распределения радиоактивных веществ уточнялась на протяжении последующих лет путем аэро-, гамма- и автомобильных бета-съемок [6–8].

В наибольшем количестве в изотопный состав выброшенной смеси входили: <sup>144</sup>Ce+<sup>144</sup>Pu — 66 %, <sup>95</sup>Zr+<sup>95</sup>Nb — 24.9 %, <sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y — 5.4 %. Радиоактивные вещества находились в составе жидких и твердых аэрозолей в хорошо растворимых соединениях — нитратах [6, 7, 9].

Погода в районе выброса определялась быстро перемещающимся циклоном. Атмосферные условия до высоты 2 км можно было описать по данным температурно-ветрового зондирования на ближайшей аэрологической станции Высокая Дубрава [10]. На высоте 10–12 м скорость ветра составляла 5 м/с, а на высотах свыше 500 м она превышала 10 м/с. Характер движения циклона 29 и 30 сентября 1957 г. вызвал правый поворот ветра по пути следования оседающего радиоактивного облака и обусловил искривление траектории радиоактивного следа.

## 2. Постановки обратных задач переноса аэрозольных примесей

Попытки проведения прямого моделирования процессов распространения радиоактивных примесей, выброшенных в атмосферу в результате взрыва емкости с радиоактивными отходами, наталкиваются на ряд трудностей, связанных с корректным описанием начального распределения аэрозольных примесей в образовавшемся облаке и заданием характеристик дисперсного состава [6, 7]. Требуются также уточнения в описании текущих метеорологических условий. Такая ситуация приводит к необходимости постановок обратных задач переноса примесей в пограничном слое атмосферы с использованием данных измерений загрязнения местности, априорных сведений о параметрах источника.

Предварительное изучение параметров взрыва емкости с радиоактивными отходами и протекавших в это время метеорологических процессов позволило выявить и уточнить основные факторы формирования картины загрязнения. Дальнейший анализ данных наблюдений по оси следа показал целесообразность рассмотрения дальней и ближней зон загрязнения.

Согласно данным экспериментальных исследований эффективность оседания аэрозольной примеси зависит от совокупного действия двух факторов: вертикального тур-

булентного обмена и гравитационного оседания частиц [11]. В дальней зоне загрязнения основная часть облака примеси уже находилась в нижней части пограничного слоя атмосферы. В этом случае необходимо учитывать изменение вертикального турбулентного обмена и скорости ветра с высотой. Для степенных аппроксимаций скорости ветра и вертикального турбулентного обмена суммарная по времени приземная концентрация тяжелой примеси для точечного источника единичной мощности и высоты  $H$  представляется в виде [12]

$$q_w(x, H) = q(x, H)\chi_w(x, H),$$

где

$$q(x, H) = q_{\max} \exp \left[ \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{x_{\max}}{x} \right) \right] \left( \frac{x_{\max}}{x} \right)^{\frac{3}{2}},$$

$$x_{\max} = \frac{2u_1 H^{1+n}}{3k_1(1+n)^2}, \quad q_{\max} = \frac{0.116(1+n)^2}{u_1 H^{1.5(1+n)}} \sqrt{\frac{k_1}{k_0 u_1}};$$

$$\chi_w(x, H) = \left( \frac{1.5x_{\max}}{x} \right)^\rho, \quad \rho = \frac{w}{k_1(1+n)};$$

$w$  — скорость оседания частиц;  $u_1$ ,  $k_1$ ,  $k_0$  — скорость ветра и коэффициенты турбулентного обмена на определенной высоте;  $n$  — показатель степени в аппроксимации скорости ветра.

Тогда суммарная плотность аэрозольных выпадений выразится соотношением

$$p_1(x) = C \int_0^h Q(H)q(x, H)\chi_w(x, H)dH. \quad (1)$$

Здесь  $C$  — коэффициент взаимодействия примеси с поверхностью земли;  $h$  — высота облака примеси;  $Q(H)$  — количество примеси на высоте  $H$ .

Учитывая, что  $\exp(-x_{\max}/x) \rightarrow 1$  при  $x \rightarrow \infty$ , из (1) следует представление

$$p_1(x) \approx \frac{\theta_1}{x^{1.5+\theta_2}}, \quad (2)$$

где  $\theta_1 = 1.5^\rho C \int_0^h Q(H)q_{\max}(H) \exp[1.5(1 - x_{\max}(H))/x] x_{\max}^{1.5+\rho}(H)dH$ ,  $\theta_2 = \rho$ .

В ближней зоне аэрозольные выпадения примеси представлены частицами более крупных фракций, опускающихся на землю существенно с больших высот. Видимо, в этом случае по высоте скорость ветра  $u$  и коэффициенты  $k_y$ ,  $k_z$  турбулентного обмена достаточно принять постоянными. В этих предположениях решение полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии для оседающей примеси представляется в явном виде и суммарная по времени приземная концентрация по оси следа опишется следующим выражением [12]:

$$q_w(x, H) = \frac{2Q(H)k_z}{\sqrt{\pi}\sigma_1 u H^2 k_y} e^{-\sigma^2} [1 - \sigma_2 \sqrt{\sigma_1} r(\sigma)], \quad (3)$$

где

$$r(\sigma) = e^{\sigma^2} [1 - \operatorname{erf} \sigma], \quad \sigma = \frac{1}{\sqrt{\sigma_1}} + \sigma_2 \sqrt{\sigma_1}, \quad \sigma_1 = \frac{4k_z x}{u H^2}, \quad \sigma_2 = \frac{w H}{4k_z}.$$

Для непосредственного вычисления концентрации с помощью (3) необходимо задание шести величин ( $Q$ ,  $u$ ,  $H$ ,  $w$ ,  $k_y$ ,  $k_z$ ), значения которых либо неизвестны, либо известны

весьма приближенно. При наличии данных измерений концентрации на оси следа оценивание концентрации можно провести иначе, введя новые обозначения и представив (3) в виде

$$f(x, \theta) = \frac{\theta_1}{x} e^{-\omega^2(x, \theta_2, \theta_3)} \left[ 1 - \theta_2 \theta_3 \sqrt{x} r(\omega(x, \theta_2, \theta_3)) \right], \quad (4)$$

где  $\theta_1 = \frac{Q}{2\sqrt{\pi}k_y}$ ,  $\theta_2 = \frac{2}{H} \sqrt{\frac{k_z}{u}}$ ,  $\theta_3 = \frac{wH}{4k_z}$ ;

$$\omega(x, \theta_2, \theta_3) = \frac{1}{\theta_2 \sqrt{x}} + \theta_2 \theta_3 \sqrt{x}.$$

Введение комплексов  $\theta_1$ – $\theta_3$  позволяет существенно снизить число неизвестных параметров. Их оценки можно получить на основе (4) методом наименьших квадратов, используя данные измерений концентрации на оси следа.

**Замечание.** На достаточном удалении от источника количество неизвестных комплексов параметров, подлежащих оцениванию, может быть еще уменьшено. В этом случае  $1 - erf \sigma \approx 0$ ,  $e^{-\frac{uH^2}{4k_z x}} \approx 1$  и приходим к следующему соотношению для плотности выпадений:

$$p_2(x) \approx \frac{C}{x} e^{-\frac{w^2}{4k_z u} x} \int_0^h f(H, x) dH = \frac{\theta_1}{x} e^{-\theta_2 x}, \quad (5)$$

где  $f(H, x) = \frac{Q(H)}{2\sqrt{\pi}k_y} e^{-2wH} e^{-\frac{uH^2}{4k_z x}}$ ;  $\theta_1 = C \int_0^h f(H, x) dH$ ,  $\theta_2 = \frac{w^2}{4k_z u}$ .

Оценки параметров регрессий (4), (5) по данным наблюдений плотности могут быть также найдены методом наименьших квадратов.

Использование соотношений (2), (4), (5) представляет особый интерес при численном анализе аварийных выбросов примесей, поскольку в этой ситуации данные о мощности и пространственной конфигурации источника, дисперсном составе примеси, как правило, отсутствуют. Определенные затруднения возникают при описании текущих полей направления и скорости ветра, а также турбулентного обмена в приземном и пограничном слоях атмосферы.

### 3. Реконструкция плотности осадка радионуклидов на осевой части следа

Для численного анализа данных загрязнения почвенного покрова в районе ВУРС были использованы результаты экспериментального обследования этой территории, представленные в виде таблиц в [6], которые составлены на основе карт радиационной обстановки 1959 и 1997 гг. [8].

Для данных карты 1959 г. оценивание параметров регрессий (2), (4) в дальней и ближней зонах проводилось в каждом случае по двум опорным точкам на оси следа, достаточно оптимально расположенным относительно друг друга [13]. Следует отметить, что концентрации в опорных точках для ближней зоны отличаются в 10 раз, а для дальней — 500 раз. Это указывает на значительные скорости оседания аэрозольных частиц, несущих радионуклиды, в рассматриваемых диапазонах расстояний. Анализ результатов моделирования,

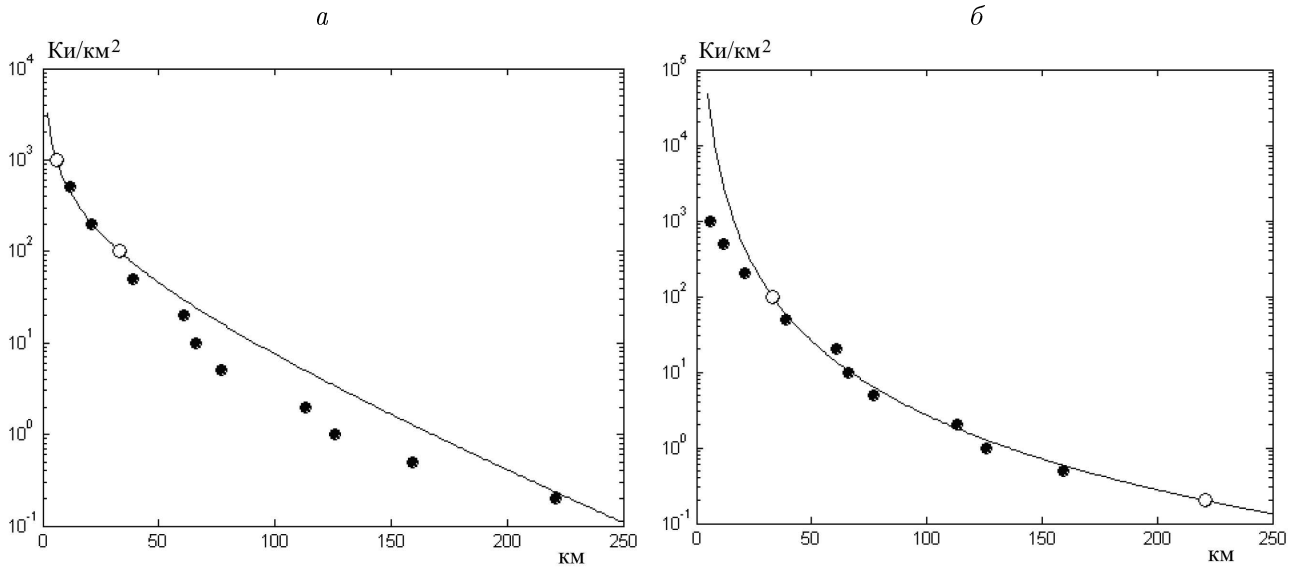


Рис. 1. Плотность радиоактивного загрязнения почвы на оси Восточно-Уральского радиоактивного следа по данным радиационной обстановки на 1959 г.: *а* — ближняя зона осевой части следа; *б* — дальняя зона; светлые и темные кружки — результаты экспериментальных исследований в опорных и контрольных точках оси следа соответственно, сплошная линия — восстановленная по моделям (2), (5) плотность осадка.

представленных на рис. 1, показывает вполне удовлетворительное согласие результатов расчетов и данных наблюдений в контрольных точках.

Это заключение подтверждается также и величиной следующего интегрального показателя:

$$k = 1/n \sum_{j=1}^n c_j / p(r_j, \theta),$$

где  $n$  — количество контрольных точек наблюдений;  $c_j$  — измеренные концентрации.

В ближней зоне  $k = 1.058$ , в дальней зоне  $k = 0.983$ . Это означает, что систематическое смещение между используемыми моделями и соответствующими данными наблюдений практически отсутствует.

На рис. 2 представлены результаты оценивания плотности загрязнения осевой части следа в дальней зоне на основе данных наблюдений 1997 г. с использованием двух и одной опорной точки, а также прогноз загрязнения на 1997 г. с учетом закона радиоактивного распада по  $^{90}\text{Sr}$ . В этом случае согласие с данными наблюдений также достаточно высокое. Интегральный показатель  $k = 0.979$ .

Поскольку параметр  $\theta_1$  пропорционален мощности выброса примеси, можно провести экстраполяцию картины загрязнения на 1997 г. с учетом результатов оценивания параметров  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  по данным карты 1959 г. На рис. 2, *б* приведен вариант расчета дальней части оси следа с дополнительным использованием лишь закона радиоактивного распада для  $^{90}\text{Sr}$ . Штриховая кривая, полученная расчетным путем, в целом прошла несколько ниже значений плотности осадка, представленных на карте 1997 г. В данном случае  $k = 1.45$ .

Во втором варианте расчета на рис. 2, *б* представлена плотность радиоактивного загрязнения на 1997 г., рассчитанная с использованием только одной опорной точки. Параметр  $\theta_2$  полагался равным его значению, полученному по данным карты 1959 г. для дальней части следа. В этом варианте расчета уровень соответствия восстановленных и

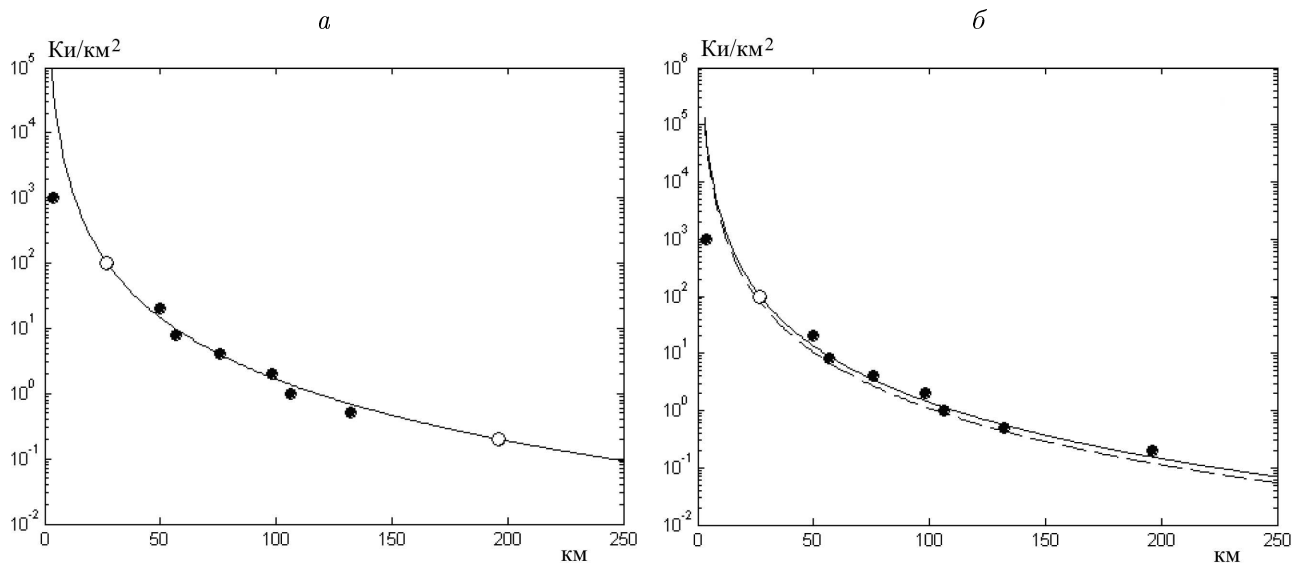


Рис. 2. Восстановленная на основе модели (2) плотность радиоактивного загрязнения почвы на оси ВУРС по данным радиационной обстановки на 1997 г.: *а* — оценка по двум опорным точкам; *б* — оценка с использованием одной опорной точки (сплошная кривая) и прогноз загрязнения на 1997 г. с учетом закона радиоактивного распада для  $\text{Sr}^{90}$  (штриховая кривая).

экспериментальных данных заметно повысился. Значение коэффициента  $k$  равно 1.15. Повышение точности оценивания объясняется практически полным отсутствием вклада в загрязнение местности на 1997 г. остальных радионуклидов по сравнению с  $^{90}\text{Sr}$ .

## Заключение

Проведенное теоретическое исследование и анализ на его основе данных натуральных наблюдений показывают возможность вполне адекватной реконструкции картины регионального загрязнения местности от высотного аэрозольного источника в рамках достаточно простых регрессионных зависимостей, вытекающих из свойств решений полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии. Неопределенность задания пространственной структуры источника и характеристик дисперсного состава примеси приводит к необходимости рассмотрения ближней и дальней зон аэрозольных выпадений радионуклидов и описания с различной степенью детализации процессов переноса примеси в пограничном слое атмосферы. Показана эффективность оценивания уровней загрязнения осевой части следа в предложенных интервалах расстояний от источника. Следует отметить, что процедура агрегирования комплексов неизвестных параметров позволяет существенно снизить размерность решаемых обратных задач о выпадении аэрозольных примесей.

Связь между оценками параметров  $\theta_1$ , полученных с использованием карт 1959 и 1997 гг. для дальней зоны, описывается законом радиоактивного распада для  $^{90}\text{Sr}$ . Параметры  $\theta_2$ , характеризующие форму кривой (2), практически совпадают для этих сроков наблюдений. Суммируя вышесказанное, можно сделать вывод о том, что процессы вымывания и дефляции радионуклидов на этой части оси следа оказали не очень существенное влияние на изменение плотности радиоактивности, а соотношение (2) вполне можно использовать в прогностических целях.

## Список литературы

- [1] ИЗРАЭЛЬ Ю.А., ЦАТУРОВ Ю.С., НАЗАРОВ И.М. и др. Реконструкция фактической картины радиоактивного загрязнения местности в результате аварий и ядерных испытаний // Метеорология и гидрология. 1994. № 8. С. 5–18.
- [2] ИЗРАЭЛЬ Ю.А., СТУКИН Е.Д., ЦАТУРОВ Ю.С. О возможности идентификации радиоактивных следов ядерных взрывов и реконструкции доз облучения населения с использованием анализа долгоживущих радионуклидов // Метеорология и гидрология. 1994. № 12. С. 5–14.
- [3] СЕДУНОВ Ю.С., БОРЗИЛОВ В.А., КЛЕПИКОВА Н.В. и др. Физико-математическое моделирование регионального переноса в атмосфере радиоактивных веществ в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидрология. 1989. № 9. С. 5–10.
- [4] РАПУГА В.Ф., САДОВСКИЙ А.П., ОЛЬКИН С.Е. Реконструкция выпадений бенз(а)пирена в окрестностях Новосибирского электродного завода // Метеорология и гидрология. 1997. № 2. С. 33–41.
- [5] РАПУГА В.Ф., КОРОЛЕВА Г.П., ГОРШКОВ А.Г., ХОДЖЕР Т.В. Исследование процессов длительного загрязнения окрестностей Иркутска тяжелыми металлами // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14, № 6–7. С. 623–626.
- [6] ИТОГИ изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана / Под ред. А.И Бурзяна. М.: Энергоатомиздат, 1990. 190 с.
- [7] ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКИЙ радиоактивный след / Под ред. В.Н. Чуканова. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 230 с.
- [8] ВАСИЛЕНКО В.Н. и др. Составление карт интегрального загрязнения от всех источников стронцием-90, цезием-137, изотопами плутония на территории Уральского региона в границах Челябинской, Свердловской и Курганской областей в масштабе 1 : 200 000 по состоянию на 1997 и 1957 гг.: Отчет. М.: ИГКЭ, 1998.
- [9] ВОЛОВУЕВ П.В., ЧУКАНОВ В.Н., ШТИНОВ Н.А., АЛЕКСЕЕНКО Н.Н. Техногенные радиационные инциденты в Уральском регионе, оценки и уточнения / Урал. Радиация. Реабилитация / Под ред. В.Н. Чуканова. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. С. 10–49.
- [10] ТЕТЕРИН А.Ф. Метеорологические условия формирования зоны Восточно-Уральского радиоактивного загрязнения. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 122 с.
- [11] ПЕТРОВА Г.М., МИРОШКИНА А.Н. Закономерности рассеяния аэрозольных частиц в свободной атмосфере // Тр. ИПГ. М.: Гидрометеиздат, 1967. Вып. 4. С. 5–40.
- [12] БЕРЛЯНД М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
- [13] ФЕДОРОВ В.В. Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1971. 312 с.

*Поступила в редакцию 9 ноября 2006 г.*