

УДК 551.511.61+504.054:504.3.0.53

Численная реконструкция радиоактивного загрязнения местности от аварии на радиохимическом заводе в Томске-7

В.Ф. Рапута*

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

Поступила в редакцию 23.01.2012 г.

Предложена модель реконструкции по оси следа поля выпадений полидисперсной примеси от мгновенного источника. Для описания процесса переноса аэрозолей в атмосфере использованы аналитические решения полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии. Фракционный состав примеси в источнике по скоростям оседания задается с помощью двойного гамма-распределения. Проведена апробация разработанной модели реконструкции на данных мониторинга аварийного загрязнения в апреле 1993 г. окрестностей радиохимического завода в Томске-7.

Ключевые слова: численное моделирование, аэрозоль, радиоактивное загрязнение, реконструкция, обратная задача; numerical modeling, aerosol, radioactive contamination, reconstruction, inverse problem.

Введение

Проблема определения количественных характеристик радиоактивного загрязнения природных сред в результате аварий на атомных станциях и предприятиях ядерно-технологического цикла является весьма актуальной. Применение методов прямого моделирования переноса загрязняющих примесей в принципе дает возможность вполне корректного описания полей концентраций, но в данном случае этот подход сталкивается со значительными затруднениями обеспечения моделей соответствующей входной информацией. К ним следует отнести неопределенности высоты и мощности источника выброса радионуклидов в атмосферу, распределение в начальном облаке аэрозольных частиц по размерам и скоростям оседания, определение текущих метеорологических условий и т.д., что приводит к необходимости использования при численном моделировании дополнительной экспериментальной информации о полях загрязнения и создания соответствующих моделей реконструкции [1–9].

Следует также отметить, что при использовании постановок обратных задач нежелательно слишком детальное описание процессов переноса радионуклидов, поскольку это может привести к большим трудностям их обоснования и численной реализации. Необходимым этапом решения этих задач является анализ информативности используемой экспериментальной информации, планирования и оптимизации систем мониторинга [3, 10, 11].

1. Модель реконструкции атмосферных выпадений полидисперсной примеси

Предварительный анализ имеющихся экспериментальных данных наблюдений аэрозольных выпадений радионуклидов показывает, что изменение уровней концентраций по мере удаления от места аварийного выброса может быть весьма значительным. Это позволяет сделать предположение о присутствии в их составе как крупных, так и достаточно мелких аэрозольных фракций. Для априорного описания распределения вещества примеси по скоростям оседания w в атмосфере воспользуемся следующей двухпараметрической функцией [12, 13]:

$$N(w) = \frac{a^{m+1}}{\Gamma(m+1)} w^m e^{-aw}, \quad m \geq -1, \quad a = \frac{m}{w_m}, \quad (1)$$

где параметр w_m характеризует скорость преобладающей по количеству частиц фракции примеси; m — степень однородности распределения частиц примеси по скоростям w ; $\Gamma(m)$ — гамма-функция Эйлера.

Исходным моментом для расчета поля выпадений полидисперсной примеси от точечного источника является следующее соотношение [12]:

$$p = \int_0^{\infty} w q_w N(w) dw, \quad (2)$$

где q_w — поле концентрации монодисперсной примеси со скоростью оседания w .

* Владимир Федотович Рапута (raputa@sscc.ru).

При расчете средней концентрации в приземном слое атмосферы определяющее значение имеют часто встречающиеся метеорологические условия. К ним относятся так называемые нормальные метеосостояния, для которых используется степенная аппроксимация скорости ветра и коэффициента вертикального турбулентного обмена [14]:

$$u(z) = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n; \quad K_z = k_1 \frac{z}{z_1}, \quad (3)$$

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

С использованием соотношений (3) и аналитических решений уравнения турбулентной диффузии для относительно невысоких источников поле концентрации q_w вблизи земли можно представить в виде [15]:

$$q_w(x, y) = \frac{Mc^\omega}{2(1+n)\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+\omega) x^{1.5+\omega}} \times \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x}\right). \quad (4)$$

Здесь ось x ориентирована в направлении ветра; ось y направлена в поперечном ветру направлении; M – мощность источника примеси; k_0 – параметр турбулентного обмена в направлении оси y ;

$$c = \frac{u_1 H^{1+n}}{(1+n)^2 k_1}; \quad \omega = \frac{w}{k_1(1+n)}. \quad (5)$$

С учетом соотношений (1), (4) выражение (2) можно представить в виде

$$p(x, y) = \frac{Ma^{m+1}}{2(1+n)\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m) x^{1.5}} \times \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x}\right) \int_0^\infty \frac{\omega^{m+1} \exp(-a\omega)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x}\right)^\omega d\omega = \frac{Ma^{m+1}(1+n)^{m+1} k_1^{m+2}}{2\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m) x^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x}\right) \times \int_0^\infty \frac{\omega^{m+1} \exp(-ak_1(1+n)\omega)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x}\right)^\omega d\omega. \quad (6)$$

В частности, для осевой концентрации ($y = 0$) соотношение (6) представляется в виде

$$p_{\text{ось}}(x) = \frac{\theta_1}{x^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{x}\right) \int_0^\infty \frac{\omega^{\theta_2} \exp(-\theta_3 \omega)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x}\right)^\omega d\omega, \quad (7)$$

где

$$\theta_1 = \frac{Ma^{m+1}(1+n)^{m+1} k_1^{m+2}}{2\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m)}, \quad \theta_2 = m+1, \\ \theta_3 = ak_1(1+n).$$

Исследование свойств функции (7) показывает, что она в интервале значений $x \in (0, \infty)$ достигает

максимума в некоторой точке x_0 , монотонно возрастает при $x \in (0, x_0)$, соответственно монотонно убывает в интервале значений $x \in (x_0, \infty)$ и стремится к нулю при $x \rightarrow 0$, $x \rightarrow \infty$. Оценка неизвестных параметров θ_1 , θ_2 , θ_3 , входящих в соотношение (7), проводится методом наименьших квадратов с использованием данных измерений уровней радиации в точках местности. Следует также отметить, что величина $1,5 \cdot c$ соответствует величине расстояния, на котором достигается максимальная приземная концентрация легкой примеси [15].

Замечание

Параметры θ_2 , θ_3 зависят от характеристик дисперсного состава аэрозольной примеси и метеорологических условий. Данное обстоятельство позволяет существенно снизить количество опорных точек измерений при проведении повторного оценивания осевого загрязнения в другие моменты времени. В этом случае достаточно лишь провести переоценку параметра θ_1 , который согласно (7) пропорционален мощности источника и изменение которого будет происходить лишь вследствие радиоактивного распада выпавших нуклидов.

2. Численные реконструкции осевой части следа, образовавшегося в результате аварии в Томске-7 в 1993 г.

6 апреля 1993 г. на радиохимическом заводе в г. Томске-7 произошло разрушение емкости с радиоактивным раствором. Авария сопровождалась кратковременным залповым выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду через вентиляционную систему, вытяжную трубу высотой 150 м, а также развал стены здания на высоте 15 м. Выброс сформировался при устойчивом ветре и ушел в северо-восточном направлении. Распределение поля радиоактивного загрязнения местности изучалось с помощью самолетной гамма-съемки, а также наземных маршрутных наблюдений загрязнения снегового и почвенного покрова. Начальная протяженность следа с уровнем более 15 мкР/ч составила 28 км, наибольшая ширина – 6 км, площадь зоны загрязнения составила более 100 км² [16]. Дальнейшие наблюдения в мае-июне показали довольно быстрое снижение уровней загрязнения, что было обусловлено распадом короткоживущих радионуклидов – ¹⁰³Ru, ⁹⁵Nb, ⁹⁵Zr, ¹⁰⁶Ru, доминировавших в составе выброса [16–18].

На рис. 1, а представлена карта радиационной обстановки в районе аварии в Томске-7 на 13 мая 1993 г., полученная по данным наземных измерений гамма-поля на высоте 1 м [17, 18].

К этому времени снеговой покров уже отсутствовал, что значительно упростило проведение наземных наблюдений и анализ полученных экспериментальных результатов. С использованием данных,



Рис. 1. Карты следов радиоактивных выпадений: *a* – загрязнение почвы от аварии в Томске-7 по состоянию на 13 мая 1993 г. (мкР/ч); *б* – загрязнения почвы на 13 июня 1993 г. (мкР/ч)



Рис. 2. Карты следов радиоактивных выпадений: *a* – загрязнение снегового покрова от аварии в Томске-7 по состоянию на 12 апреля 1993 г. По данным аэро-гамма-съемки (проведены изолинии 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 75, 100 мкР/ч); *б* – загрязнения снегового покрова на 12 апреля 1993 г. (мкР/ч) по данным наземных наблюдений

приведенных на рис. 1, *a*, и модельной зависимости (7) была проведена реконструкция осевой части следа. Для проведения оценки неизвестных параметров θ_1 , θ_2 , θ_3 в качестве опорных уровней измерений были использованы уровни: 110, 240, 1000 мкР/ч. Результаты численного восстановления осевых выпадений радионуклидов по заданным трем опорным уровням измерений представлены на рис. 3, *a*.

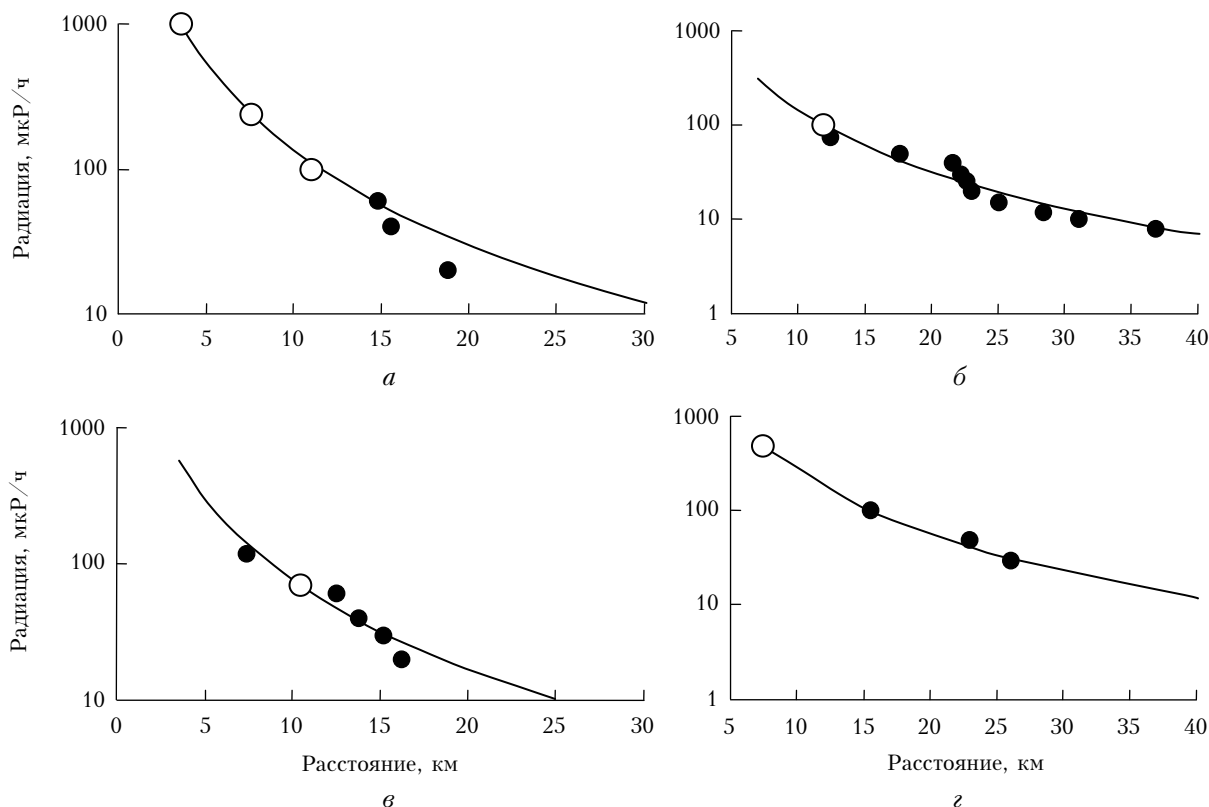


Рис. 3. Численно восстановленные по данным измерений уровни радиоактивного загрязнения почвы и снегового покрова от аварии в Томске-7 1993 г. вдоль оси следа: *а* – по состоянию на 13 мая, *б* – на 12 апреля (самолетная гамма-съемка), *в* – на 13 июня, *г* – на 12 апреля (наземные наблюдения); — — результат численного моделирования; ○, ● — опорные и контрольные точки измерений

С использованием одной опорной точки на оси следа и оценок параметров θ_2, θ_3 , взятых из предыдущего расчета, был проведен численный анализ полей радиоактивного загрязнения от аварии в Томске-7 к моментам времени 12 апреля и 13 июня 1993 г., представленных на рис. 1, б и рис. 2 [17, 18].

На рис. 3, б – г приведены результаты восстановления выпадений нуклидов в осевых направлениях с помощью модельной зависимости (7) по данным аэро-гамма и наземной снеговой и почвенной съемок.

Анализ результатов моделирования показал вполне удовлетворительное согласие измеренных и вычисленных значений активности в контрольных точках измерений. Несмотря на значительную высоту источника, произошло довольно быстрое снижение уровней загрязнения с расстоянием, что указывает на большую разнородность дисперсного состава выброшенной смеси радионуклидов. Тем не менее первоначальная протяженность следа составила не менее 40 км.

Из сравнения вычисленных оценок параметров θ_1 , полученных с помощью самолетной и наземной гамма-съемки снегового покрова, следует, что после аварии по данным аэросъемки мощность дозы в среднем на 40% ниже. Анализ рис. 1, а и б показывает заметное снижение в течение месяца уровня загрязнения почвы, что в первую очередь связано с процессами радиоактивного распада.

Заключение

Разработанная малопараметрическая модель реконструкции выпадений полидисперсной примеси дает возможность численного анализа данных наблюдений практически по всей оси следа. Для получения оценок неизвестных параметров в зависимости (7) требуется привлечение относительно небольшого объема данных измерений. Как показал численный анализ данных радиационного мониторинга, весьма полезным приемом оказалось выделение группы параметров, зависящих от характеристик дисперсного состава, что позволило при восстановлении полей осевых концентраций в другие моменты времени дополнительно сократить количество используемых уровней измерений. Весьма полезной является информация о количественном составе выброшенной в атмосферу радионуклидной смеси. Ее наличие позволяет после проведения численной реконструкции поля выпадений нуклидов дать прогноз радиационной обстановки на последующие моменты времени.

Для анализа данных мониторинга аварийного загрязнения в ближней зоне необходим более детальный учет вертикального распределения относительной активности в облаке взрыва. В связи с этим полезно привлечение дополнительной априорной информации о характере и мощности взрыва.

Автор выражает благодарность В.А. Чиркову за предоставленную информацию и полезные обсуждения в процессе работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4.4, ИП СО РАН № 84.

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. Андриюшин И.А., Чернышев А.К., Лозачев В.А., Михалихина Л.А., Степанов Ю.С., Красилов Г.А., Матущенко А.М., Дубасов Ю.В. Современная интерпретация данных воздушной и наземной радиационных разведок следа первого ядерного испытания в СССР в 1949 г. // Вестн. научн. программы «Семипалатинский полигон – Алтай». 1995. № 2. С. 102–108.
3. Рапута В.Ф. Модели реконструкции загрязнения осевой части Восточно-Уральского радиоактивного следа // Вычислит. технол. 2006. Т. 11, ч. 2. С. 10–16.
4. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. Исследование дисперсного состава аэрозоля в периоды весенней дымки и лесных пожаров // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 6. С. 468–477.
5. Таловская А.В. Геохимическая характеристика пылевых атмосферных выпадений на территории г. Томска // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 519–524.
6. Ярославцева Т.В., Рапута В.Ф. Численная модель реконструкции полей выпадений вулканического пепла // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 6. С. 521–524.
7. Рапута В.Ф., Таловская А.В., Коковкин В.В., Язиков Е.Г. Анализ данных наблюдений аэрозольного загрязнения снегового покрова в окрестностях Томска и Северска // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 74–78.
8. Шлычков В.А., Селегей Т.С., Мальбахов В.М., Леженин А.А. Диагноз экстремальных концентраций формальдегида в г. Томске на основе численного моделирования // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 493–498.
9. Макухин В.Л., Янченко Н.И., Баранов А.Н. Исследование процессов распространения, трансформации и осаждения соединений фтора и серы в районе г. Братск // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 525–528.
10. Успенский А.Б., Федоров В.В. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. 168 с.
11. 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.
12. Прессман А.Я. О распространении в атмосфере тяжелой неоднородной примеси из мгновенного точечного источника // Инж.-физ. журн. 1959. Т. 2, № 3. С. 78–87.
13. Петров В.Н., Прессман А.Я. Оценка влияния турбулентного рассеяния по вертикали и в направлении ветра на распространение полидисперсной примеси // Докл. АН СССР. 1962. Т. 146, № 1. С. 86–88.
14. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 278 с.
15. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 272 с.
16. Израэль Ю.А., Артемов Е.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д., Зиненко В.И., Кривошапко А.И., Лященко Н.Г., Пахомов В.Г., Чирков В.А., Стукин Е.Д. Радиоактивное загрязнение местности в результате аварии на радиохимическом заводе в Томске // Метеорол. и гидрол. 1993. № 6. С. 5–8.
17. Булатов В.И., Чирков В.А. Томская авария: мог ли быть сибирский Чернобыль? Новосибирск: ЦЭРИС, 1993. 32 с.
18. Вакуловский С.М., Шершаков В.М., Бородин Р.В., Возженников О.И., Газиев Я.И., Косых В.С., Махонько К.П., Чумичев В.В. Анализ и прогноз радиационной обстановки в районе аварии на Сибирском химическом комбинате // Радиация и риск. 1993. Вып. 3. Прил. 2. С. 3–48.

V.F. Raputa. Numerical reconstruction of regional radioactive contamination by the accident at radiochemical plant in Tomsk-7.

The model of reconstruction of polydisperse admixture fallout fields along the trace axis of instantaneous source was proposed. To describe a process of aerosol transfer in the atmosphere, analytical solutions of semi-empirical equation of turbulent diffusion were applied. Admixture fractional composition within a sedimentation velocity in the source is specified by a double Gamma-distribution. Approbation of a developed model was done on the monitoring data of the accident at radiochemical plant in Tomsk-7 on April 1993.