

# МОДЕЛИ РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЕЙ ВЫПАДЕНИЙ РАДИОНУКЛИДОВ ОТ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ И АВАРИЙ

В. Ф. Рапута<sup>1</sup>, Т. В. Ярославцева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск*

<sup>2</sup> *Новосибирский НИИ гигиены Роспотребнадзора, 630108, Новосибирск*

551.511.42.001.572(571.14)

Предложены модели оценивания полей атмосферных выпадений разнородных аэрозольных примесей от точечных и вертикально распределённых источников по данным наблюдений осевых концентраций. На данных натурных наблюдений радиоактивного загрязнения территорий проведена апробация предложенных моделей применительно к ряду испытательных ядерных взрывов на Семипалатинском полигоне. Применительно к Восточно-Уральскому радиоактивному следу численно восстановлена осевая концентрация выпадений радионуклидов.

**Ключевые слова:** аэрозоль, модель, параметр, оценка, радиоактивное загрязнение.

## Введение

Численное оценивание полей радиоактивного загрязнения территорий является весьма актуальной задачей. В ряде случаев, связанных с аварийным выбросом радионуклидов, использование методов прямого моделирования переноса загрязняющих примесей сталкивается со значительными затруднениями. В первую очередь это обусловлено разносторонним обеспечением моделей переноса необходимой входной информацией. Она включает в себя задание в начальный момент времени вертикального распределения радиоактивности в облаке взрыва, описание функций распределения по размерам радиоактивных частиц, определение поля ветра в значительном диапазоне высот и т.д. Ситуация может быть существенно улучшена при наличии дополнительной экспериментальной информации о полях радиоактивных выпадениях. В этом случае существует возможность создания различных моделей реконструкции полей загрязнения [1], [2]. Основу этих моделей составляют модельные описания процессов атмосферного переноса газовых и аэрозольных примесей от точечных и распределённых источников [3], [4]. Предлагаемый подход представляет дополнительные возможности в решении многих теоретических и практических задач динамики атмосферы и численной интерпретации данных мониторинговых исследований загрязнения территорий.

## 1 Модели реконструкции

Использование свойств решений уравнения переноса и диффузии примеси и дополнительной априорной информации о дисперсном составе примесей в источнике, вертикальной структуре источников, метеорологических условиях позволяют создавать модели оценивания полей загрязнения, базирующиеся на сравнительно небольших объёмах данных наблюдений.

*а) Крупнодисперсная примесь.*

Анализ данных экспериментальных исследований загрязнения территорий от наземных ядерных взрывов и аварийных выбросов на предприятиях ядерно-энергетического комплекса показывает довольно быстрое убывание уровня радиоактивности по оси следа [4]–[7], что указывает на возможность использования полукинематической схемы распространения частиц в атмосфере. В этом случае движение частиц одного размера

от источника представляет собой падение с постоянной стоксовой скоростью и перенос аэрозольной примеси можно описать следующим уравнением

$$u(z)\frac{\partial Q}{\partial x} - w\frac{\partial Q}{\partial z} = \mu\frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \quad (1)$$

с граничными условиями

$$u(z)Q|_{x=0} = M\delta(z-H)\delta(y), \quad Q \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad y \rightarrow \pm\infty. \quad (2)$$

Здесь ось  $x$  находится в горизонтальной плоскости и ориентирована в направлении среднего ветра, ось  $y$  ориентирована в поперечном направлении, ось  $z$  направлена вертикально вверх,  $Q(x, y, z) = \int_0^\infty q(t, x, y, z)dt$ ,  $q(t, x, y, z)$  — концентрация монодисперсной примеси в момент времени  $t$  в точке  $(x, y, z)$ ,  $u(z)$  — горизонтальная скорость ветра в направлении оси  $x$ ,  $w$  — скорость оседания частиц по оси  $z$ ,  $M, H$  — мощность и эффективная высота источника,  $\delta$  — дельта-функция Дирака.

Плотность выпадений монодисперсной примеси по оси следа ( $y = 0$ ) оценивается с помощью соотношения [8]

$$P(x) = \int_0^\infty wQ(x, y, z)|_{y=0, z=0} N(w)dw, \quad (3)$$

где  $N(w)$  — распределение размеров частиц полидисперсной примеси в источнике по скоростям оседания

$$N(w) = \frac{n^{n+1}}{w_k \Gamma(n+1)} \left[ \frac{w}{w_k} \exp\left(-\frac{w}{w_k}\right) \right]^n.$$

Из свойств уравнения (1) вытекает, что перенос частиц в плоскости  $(x, z)$  происходит вдоль линий, описываемых решениями уравнения

$$\frac{dz}{dx} = \frac{w}{u(z)}. \quad (4)$$

С учётом (4) плотность выпадений примеси по оси следа представляется в виде [9]

$$p(x, \bar{S}) = S_1 x^{-S_2} \exp\left(-\frac{S_3}{x}\right), \quad (5)$$

где функция  $S_1 = \frac{Mu}{\Gamma(n+1)} \left(\frac{nHu}{w_k}\right)^{n+1}$ ,  $S_2 = n + 2$ ,  $S_3 = \frac{nH\bar{U}}{w_k}$ ,  $\bar{U} = \frac{1}{H} \int_0^H u(z)dz$ . Оценка вектора неизвестных параметров  $\bar{S}$  в регрессии (5) проводится методом наименьших квадратов по данным измерений плотности выпадений примеси по оси следа.

*Замечание.* Для учёта вертикального распределения радиоактивности в облаке взрыва необходимо выражение (5) проинтегрировать по  $H$ , после чего проводить оценивание.

#### б) Реконструкция мелкодисперсных фракций.

Анализ крупных радиационных аварий показывает, что высота подъёма примеси обычно находится в пределах пограничного слоя атмосферы. Спектр же размеров частиц варьируется в широких пределах и для повышения точности оценивания поля выпадений частиц в дальней зоне необходимо более детальное описание процессов распространения мелких фракций частиц. В этом случае целесообразно использовать следующую модель реконструкции выпадений [4]

$$p(x, \bar{\theta}) = \frac{\theta_1}{x^{1.5}} \exp - \frac{2x_{max}}{x} \int_0^\infty \frac{\lambda^{\theta_2} \exp(\theta_3 \lambda)}{\Gamma(1 + \lambda)} \left(\frac{2x_{max}}{x}\right)^\lambda d\lambda. \quad (6)$$

Здесь параметры  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  предполагаются неизвестными и их оценивание проводится по данным наблюдений. Величина  $x_{max}$  описывает расстояние от источника, на котором достигается максимум приземной концентрации невесомай примеси.

## 2 Численная реконструкция следов наземных ядерных взрывов

### а) Ядерный взрыв 29.08.1949 г.

Для численного восстановления радиоактивного загрязнения по оси следа использовалась информация, приведённая в [5], [6]. Взрывное устройство былорасположено на высоте 30 м. Мощность взрыва составила 22 кт. Верхняя кромка облака взрыва находилась на высоте около 9 км. Изменение мощности дозы гамма-излучения вдоль оси следа представлено на рис. 1а. Анализ рис. 1а показывает высокий уровень загрязнения ближней зоны выпадений частиц. Максимум радиоактивного загрязнения местности образовался в 4-5 км от места испытания. Следует также отметить, что дальнейшее снижение мощности дозы в зоне до 100 км происходило не монотонно.

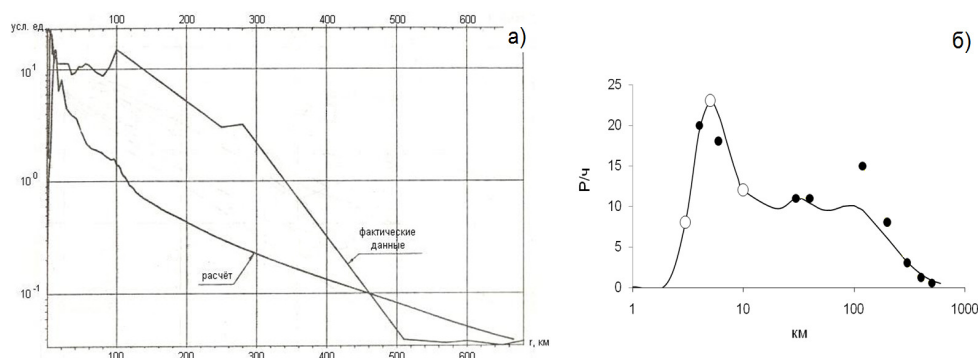


Рис. 1: Доза гамма-излучения (усл. ед., на 3 часа) вдоль оси следа взрыва 29.08.1949 г. (а). Реконструкция поля доз по оси следа (б).  $\circ$  — опорные,  $\bullet$  — контрольные точки наблюдений, — — результат численного моделирования

На основе модели (5) по трём опорным точкам измерений, расположенным в пределах 10 км от источника, была выполнена численная реконструкция осевой концентрации, которая представлена на рис. 1б. Из результатов моделирования вытекает вполне удовлетворительное согласие в контрольных точках измеренных и вычисленных значений активности. Отклонение, наблюдаемое на расстоянии 120 км (с. Долонь), может быть связано с вымыванием осадками продуктов ядерного взрыва [6]. Другой возможной причиной возникшего отклонения является не вполне адекватное описание распределения начальной активности по высоте.

### б) Термоядерный взрыв 12.08.1953 г.

На рис. 2а представлена одна из заключительных стадий развития облака от этого взрыва. Из анализа рис. 2а вытекает, что вертикальный размер облака является достаточно ограниченным. Данное заключение подтверждается и результатами авиационной радиационной разведки уровней активности на различных высотах [7]. Формирование следа радиоактивных выпадений происходило в юго-восточном направлении от опытного поля. Примерно в 400 км по оси следа суммарная доза находилась на уровне одного рентгена [7].

Результаты численной реконструкции по модели (5) уровней радиоактивного загрязнения по оси следа представлены на рис. 2б. Для восстановления поля концентрации были также использованы наблюдения в трёх опорных точках. Следует отметить, что в данном случае максимум загрязнения образовался довольно далеко от места взрыва. Поле концентрации в окрестностях максимума резко меняется, что указывает на достаточно однородный спектр размеров выпавших частиц.

## 3 Реконструкция Восточно-Уральского радиоактивного следа

Аварийный выброс радиоактивных веществ в атмосферу произошёл на ПО «Маяк» 29 сентября 1957 года. В окружающей среде оказалось 20 млн Ки, из которых большая часть — 18 млн Ки в составе крупных фракций частиц выпали в ближней зоне. Остальная часть — 2 млн Ки, поднявшись на значительную высоту, образовала радиоактивное облако. Оно распространялось в северо-восточном направлении и образовало

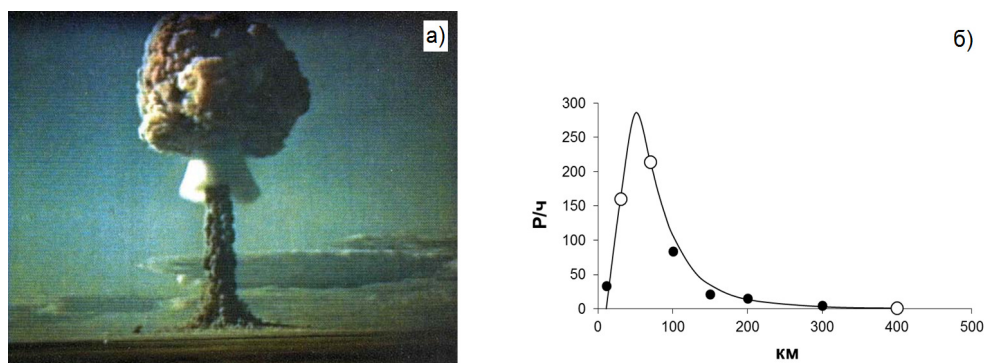


Рис. 2: Одна из стадий наземного взрыва термоядерного устройства на Семипалатинском полигоне 12.08.1953 г. (а). Численная реконструкция радиоактивного загрязнения на оси следа (б)

Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС), который прошёл по территориям Челябинской, Свердловской и Тюменской областей (рис. 3а) [10]. Протяжённость следа составила несколько сот километров. На рис. 3б представлены результаты численного восстановления по модели (6) поля выпадений радионуклидов на осевой части ВУРС. Согласие расчётов наблюдениям в контрольных точках является вполне удовлетворительным. Учитывая, что на рис. 3б значения плотности радиоактивных выпадений (вертикальная ось) представлены в логарифмическом масштабе, можно сделать вывод о чрезвычайно разнородном составе выпавших из облака аэрозольных частиц, несущих на себе радионуклиды.

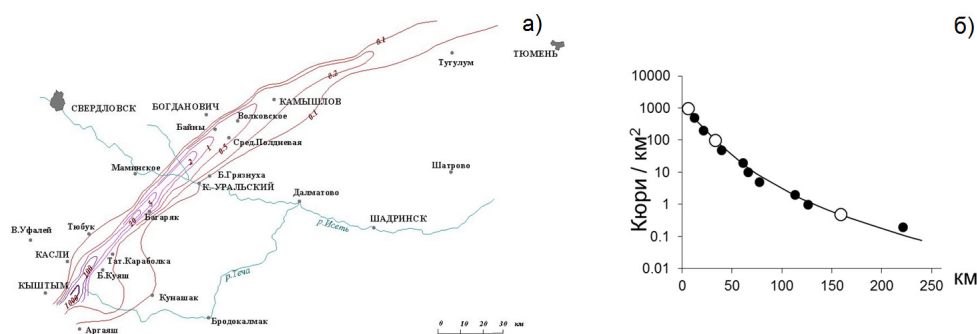


Рис. 3: Поле радиоактивного загрязнения почвы ( $\text{Ки}/\text{км}^2$ ) в районе Восточно-Уральского радиоактивного следана 1959 г. (а). Численная реконструкция по оси ВУРС (б)

При наличии информации о радионуклидном составе выброса проведённая реконструкция начального поля позволяет прогнозировать уровни загрязнения. В данном случае основным компонентом выброса являлся  $^{90}\text{Sr}$ . Делая поправку на закон его радиоактивного распада можно рассчитать состояние загрязнения ВУРС на любой момент времени.

## Заключение

На основе полукинематического уравнения атмосферного переноса грубодисперсной примеси разработаны малопараметрические модели реконструкции осевой части следа выпадений частиц. Проведена апробация модели для ряда наземных ядерных взрывов, которая показала вполне удовлетворительное согласие с данными наземного и авиационного радиационного мониторинга. Показано, что при проведении оценивания учёт вертикального распределения активности в облаке взрыва может оказаться весьма существенным и в связи с этим необходимо использование дополнительных сведений о характере и мощности ядерного взрыва.

Предложена модель реконструкции поля аэрозольных выпадений с учётом полного спектра размеров частиц. Она позволяет проводить восстановление поля концентрации по всей оси следа. Проведена апробация модели применительно к Восточно-Уральскому радиоактивному следу. Работа выполнена при финансовой

поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 16.

## 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., Чернокожин Е.В., Троянова Н.И. Физико-математическое моделирование регионального переноса в атмосфере радиоактивных веществ в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидрология. 1989. № 9. С. 5–10.
- [4] Рапута В.Ф. Модели реконструкции загрязнения осевой части Восточно-Уральского радиоактивного следа // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11, Ч. 2. Спецвыпуск. С. 10–16.
- [5] Прессман А.Я. О распространении в атмосфере тяжёлой неоднородной примеси из мгновенного точечного источника // Инженерно-физический журнал. 1959. Т. 2. № 3. С. 78–87.
- [6] Андришин И.А., Чернышев А.К., Логачёв В.А. и др. Современная интерпретация данных воздушной и наземной радиационных разведок следа первого ядерного испытания в СССР в 1949 г. // Вестник научной программы "Семипалатинский полигон — Алтай". 1995. № 2. С. 102–108.
- [7] Лоборев В.М., Замышляев Б.В., Судаков В.В. и др. Оценка уровней радиоактивного загрязнения территории Алтая и эффективных доз облучения населения от ядерных взрывов, проведённых на Семипалатинском полигоне / Ядерные испытания, окружающая среда и здоровье населения Алтайского края. Барнаул, 1993. Т. 1. Кн. 2. С. 5–125.
- [8] Ядерные испытания СССР: современное радиоэкологическое состояние полигонов. / Кол. авторов под рук. проф. В.А. Логачева. М.: Изд.АТ, 2002. 639 с.
- [9] Рапута В.Ф., Шлычков В.А., Леженин А.А. и др. Численный анализ данных аэрозольных выпадений примесей от высотного источника // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 08. С. 713–718.
- [10] Восточно-Уральский радиоактивный след / Под ред. В.Н. Чуканова. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 230 с.

*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 — 30 апреля 2017 г.*