

## ИМИТАЦИОННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ

© 2010 С.В. Губарев<sup>1</sup>, Д.Б. Берг<sup>2,3</sup>, А.П. Сергеев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

<sup>2</sup> Международный институт Александра Богданова, г. Екатеринбург

<sup>3</sup> Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург

Поступила в редакцию 01.10.2010

В статье анализируется имитационный подход к моделированию распространения загрязнений от точечного источника заданной мощности. Приводятся математические описания созданных правил клеточного автомата. Показан пример расчета поля поверхностного загрязнения, полученного в результате имитационного моделирования. Результат моделирования сравнивается с расчетом по методике ОНД-86. Приведен пример реального профиля загрязнения, полученный в ходе планового проботбора снега вблизи каменного карьера.

Ключевые слова: *математическое моделирование, клеточные автоматы, имитационное моделирование*

Невозможно представить себе техническое развитие любой страны, без привлечения внимания к экологическому аспекту такого развития. Любые глобальные или локальные воздействия на окружающую среду в той или иной степени вызывают отклик локальной экосистемы и биосферы в целом. Отсутствие до настоящего времени объективных методов оценки негативных экологических последствий породило прагматический стиль решения хозяйственных вопросов. В связи с этим основанная задача промышленной экологии заключается в оценке воздействий антропогенной деятельностью человека на окружающую его экосистему, а также выработке основных концепций, на основе существующих теоретических достижений, описывающих жизненные циклы экологических систем. Одним из важных этапов достижения такой цели является понимание сути природных процессов, возможность их моделирования и создания теоретических моделей, способных давать оценочные результаты степени техногенных загрязнений.

Процесс рассеивания загрязняющих веществ зависит от условий их эмиссии, переноса и турбулентного смешивания. За явление переноса отвечают процессы ветрового массопереноса, седиментации и вторичного массопереноса. Характер эмиссии загрязнения определяется параметрами источника. Существует множество моделей для анализа распределения концентрации загрязняющего вещества от различного рода источников загрязнений и атмосферных параметров. Одной из распространенных моделей являются Гауссовы модели [1], предназначенные для

моделирования распространения загрязнения без учета рельефа местности, которые модифицируются путем введения эмпирических коэффициентов, учитывающих возможное повышение концентрации в застойных зонах вблизи зданий, сооружений, впадин и лощин и т.п. Такой подход использован, например, в документе ОНД-86. Этот метод рекомендуется для установления нормативов ПДК (предельно допустимых концентраций) в Российской Федерации. Данная методика предназначена для расчета приземных концентраций в двухметровом слое над поверхностью земли, а также вертикального распределения концентраций. Степень опасности загрязнения атмосферного воздуха характеризуется наибольшим рассчитанным значением концентрации, соответствующим неблагоприятным метеорологическим условиям, в том числе опасной скорости ветра. В данной работе рассматривается 2 подхода к моделированию рассеивания загрязняющих примесей в атмосфере. Первый подход реализован на общепринятой в Российской Федерации методике ОНД-86, в качестве второго подхода используется имитационное моделирование на основе клеточного автомата.

**Имитационное моделирование на основе метода клеточных автоматов.** Имитационные модели в вычислительной среде клеточных автоматов (КА) [2, 3, 6] являются альтернативой дифференциальным уравнениям при моделировании сложных физических процессов. Модели КА хорошо зарекомендовали себя в различных физических приложениях и позволяют относительно легко реализовать суперпозицию источников загрязнения различной формы и интенсивности, а также мультипликативное влияние нестационарности выбросов и стохастичности метеорологических процессов. Основные принципы построения имитационной модели представлены в работах [2-4, 6], здесь же представлены созданные элементы модели КА.

Губарев Семен Викторович, аспирант. E-mail: [tnogono@gmail.com](mailto:tnogono@gmail.com)

Берг Дмитрий Борисович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник. E-mail: [bergd@mail.ru](mailto:bergd@mail.ru)

Сергеев Александр Петрович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией. E-mail: [sergeev@ecko.uran.ru](mailto:sergeev@ecko.uran.ru)

**Модель распространения загрязнений.** Основными элементами модели КА являются пространства, правила и окрестности правил. Для имитационного моделирования перераспре-

деления загрязнения были созданы пространства, представленные в табл. 1 и правила, представленные в табл. 2.

**Таблица 1.** Пространства имитационной модели

Описание	Аналог аналитического выражения
Пространство концентраций	
Кортеж $M(\vec{r}, t) = \langle m(\vec{r}) \rangle$ описывает распределение концентрации в каждой точки пространства, в каждый момент времени	Начальные условия вида: $c(x, y, z, 0) = f_c(x, y, z)$ концентрация загрязняющего вещества в начальный момент времени
Пространство поверхности	
Кортеж $Srf(\vec{r}, t) = \langle POW_{src}(\vec{r}), H_{src}(\vec{r}), Z_{srf}(\vec{r}) \rangle$ описывает подстилающую поверхность. $POW_{src}(\vec{r})$ Мощность источника $H_{src}(\vec{r})$ Высота источника $Z_{srf}(\vec{r})$ Уровень шероховатости	Граничные условия вида: $h(x, y) = f_h(x, y)$ уравнение описывает распределение высоты поверхности. Здесь же определяется функция мощности действующих источников $f_s(x, y, z, t)$ .
Пространство ветра	
Кортеж $W(\vec{r}, t) = \langle u_{wind}(\vec{r}) \rangle$ Описывает направление и скорость ветра к каждой точке пространства	$u(x, y, z, \varphi) = f_u(x, y, z, \varphi)$ функция распределения скорости и направления ветра

**Таблица 2.** Правила имитационной модели

Описание правила КА	Аналитическое выражение
Ветровой массоперенос	
$P[M(\vec{r} + \vec{r}_c, t) = m_1 \cup M(\vec{r}_c, t) = m_2 \cup m_2 > 0 \Rightarrow$ $M(\vec{r} + \vec{r}_c, t + 1) = m_1 + m_2 \cup M(\vec{r}_c, t + 1) = 0] \sim e^{-\frac{(\vec{r} - \vec{r}_0)^2}{\sigma^2}}, \forall \vec{r} \in N(\vec{r}_0)$ $\vec{r}_0$ среднее расстояние, которое пройдет частица за время одной итерации, под действием ветра. $\vec{r}$ расстояние до точки окрестности $N(\vec{r}_0)$ $N(\vec{r}_0)$ заданная окрестность правила. Наглядная демонстрация правила показано на рис. 2.	Перераспределение загрязнения вдоль направления средней скорости ветра $\frac{\partial C}{\partial t} = u \frac{\partial C}{\partial x}$ , где $u$ средняя скорость ветра
Турбулентная диффузия	
$P[M(\vec{r} + \vec{r}_c, t) = m_1 \cup M(\vec{r}_c, t) = m_2 \cup m_2 > 0 \Rightarrow$ $M(\vec{r} + \vec{r}_c, t + 1) = m_1 + m_2 \cup M(\vec{r}_c, t + 1) = 0] = P_{id}, \forall \vec{r} \in N(\vec{r}_0)$ $P_{id}$ вероятность турбулентной диффузии. В зависимости от заданной окрестности можно установить отдельно степень турбулентности по каждому направлению	Выражение описывает перераспределение концентрации в атмосфере за счет турбулентной диффузии $\frac{\partial C}{\partial t} = \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} K_i \frac{\partial C}{\partial x_i}$ , где $K_i$ значение коэффициентов турбулентной диффузии по каждому направлению
Седиментация	
$P[M(\vec{r} + \vec{r}_c, t) = m_2 \cup M(\vec{r}_c, t) = m_1 \cup m_1 > 0 \Rightarrow$ $M(\vec{r} + \vec{r}_c, t + 1) = m_1 + m_2 \cup M(\vec{r}_c, t + 1) = 0] = \frac{\vec{r} \pm v_z t_i}{L}, \forall \vec{r} \in \{\vec{a}_1, \vec{a}_2\}$ $L =  \vec{a}_1 + \vec{a}_2 $ Знак $\pm$ ставится соответственно для $a_1, a_2$ . Конкурирующие клетки выводятся из соотношения $\begin{cases} a_1 \leq v_z t_i \leq a_2 \\ a_2 = a_1 + H_c \end{cases}$ $v_z$ средняя скорость седиментации частиц (м/с), $t_i$ время одной итерации (с),	Выражение описывает перераспределение концентрации загрязнения за счет процесса оседания частиц на поверхность $\frac{\partial C}{\partial t} = -\omega \frac{\partial C}{\partial x_3}$ , где $\omega$ средняя скорость оседания частиц
Эмиссия загрязняющих веществ	
$P[M(\vec{r} + \vec{r}_c, t) = m_1 \cup Srf(\vec{r}_c, t) \in S \Rightarrow$ $M(\vec{r} + \vec{r}_c, t + 1) = m_1 + Pow] = P_{src}, \forall \vec{r} \in N(\vec{r}_c)$	Выражение описывает влияние на концентрацию загрязнения за счет действия источников

$P_{src}$  вероятность эмиссии источника. Правило описывает эмиссию загрязняющих веществ от источников загрязнения. Мощность источника и вероятность выброса задаются отдельно для каждого источника. Геометрическая форма источника задается окрестностью правила эмиссии, рис. 3.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = f_S(x, y, z, t), \quad \text{где функция } f_S(x, y, z, t) \text{ описывает мощность источников загрязнений}$$

**Сравнение результатов имитационной модели и методики ОНД-86.** Моделировалось распределение загрязнений от точечного источника заданной мощности. В качестве результата моделирования выступает поле концентраций загрязняющего вещества. Методика

ОНД-86 была реализована в вычислительной среде MathCad, ее реализация основана на документе [5]. Основные параметры моделей представлены в табл. 3, результаты моделирования – на рис. 1.

Таблица 3. Параметры имитационной модели и методики ОНД-86

Параметр	Имитационная модель	Методика ОНД-86
скорость седиментации $v_z$	0,1 м/с	F=1
скорость ветра $u$ , м/с	0/5	U=0,5
направление ветра $\alpha_u$	0 °	всегда вдоль оси оХ
кол-во источников	1	1
мощность источника	0,5 г/с	M=0,5 г/с
тип источника	точечный	точечный
высота источника	10 м	H=10 м
коор-ты источника, м	(20,60)	(20,60)
размерность матрицы, клетки	500x120x20	-
размер одной клетки, м	1	-
время одной итерации, с	1	-
количество итераций	1200	-
перегрев струи $dT$	-	0,001 $\approx$ 0 (отсутствует)
параметр атмосферы А	-	200
параметр $\eta$	-	1

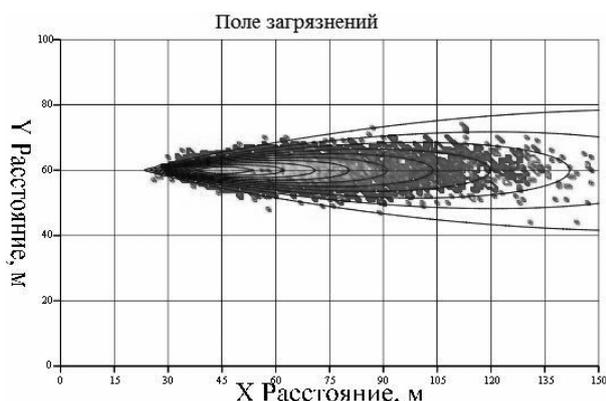


Рис. 1. Карта равных концентраций моделируемого поля поверхностных загрязнений. Градиентом серого – результат имитационного моделирования. Линиями – результат расчета по методике ОНД-86.

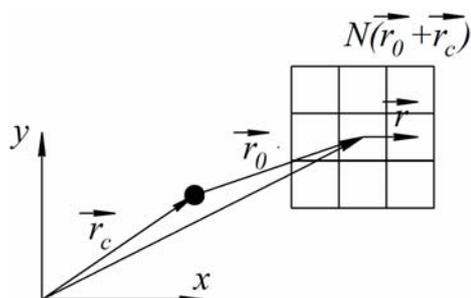
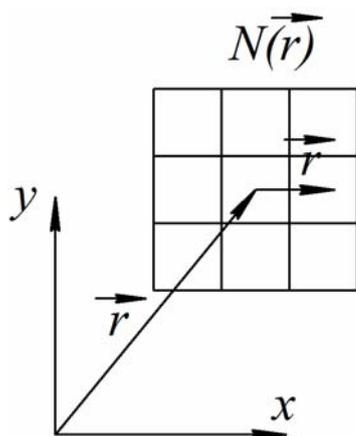


Рис. 2. Показана произвольная окрестность  $N(r_c)$  точки  $r_c$ . Окрестность задает геометрию источника загрязнения (загрязняющее вещество может появиться в любой клетке заданной окрестности)



**Рис. 3.** Показано возможное перемещение частицы из точки  $r_c$  в точку окрестности  $N(r_c+r_0)$ . Окрестность определяет степень устойчивости выбранного направления движения

**Выводы:** в статье приведены 2 подхода к моделированию распространения загрязнений. Имитационный подход основанный на вероятностной природе правил КА, а также дискретности времени и пространства, показывает неравномерное поведение распределения вещества вдоль оси факела источника загрязнений, в то время как методика ОНД-86 предсказывает гладкое поведение распределения загрязняющего вещества. При усреднении нескольких реализаций имитационного моделирования, наблюдается сглаживание кривой распределения, и в среднем результаты двух подходов качественно совпадают. В работе [8] был проведен натурный эксперимент по выявлению массы пыли в снежном покрове в непосредственной близости от каменного карьера. В результате была построена кривая распределения массы пыли вдоль выделенного направления (вкладыш на рис. 6). В распределении присутствует явно выраженная стохастическая природа процессов перераспределения веществ, как и при имитационном моделировании.

В качестве отличительной особенности имитационной модели можно отметить возможность учета сложных граничных условий, а также простой учет физико-химических процессов в атмосфере (коагуляция частиц, нуклеация и т.п.) процессов вторичного перераспределения вещества (вымывание, радиоактивный распад, почвенная диффузия и др.). Построенная имитационная модель является трехмерной, в то время как методика ОНД-86 оперирует двумерным полем распределения загрязняющего вещества. Дальнейшие направления в работе над имитационной моделью: учет сложной формы подстилающей поверхности, учет температурной стратификации атмосферы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бызова, Н.Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси / Н.Л. Бызова, У.К. Гаргер, В.Н. Иванов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. 290 с.
2. Губарев, С.В. Имитационное моделирование распределения двухфазных загрязнений атмосферы / С.В. Губарев, К.А. Беклемишев, Д.Б. Берг // Материалы Международной молодежной научной конференции. Ереван. 2007. С. 22-27.
3. Wolfram, Stephen. A New Kind of Science // Wolfram Media, Inc., May 14, 2002. ISBN 1-57955-008-8
4. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86.
5. Тоффали, Т. Машины клеточных автоматов / Т. Тоффали, Н.М. Марголус. – М.: Мир, 1991. 280 с.
6. Чуканов, В.Н. Диагностика загрязнений снегового покрова растворимыми и нерастворимыми формами металлов / В.Н. Чуканов, А.П. Сергеев, С.М. Овчинников, А.Н. Медведев // Дефектоскопия. 2006. №9.
7. Сергеев, А.П. Горизонтальное распределение накопленной в снеге пыли от действующих карьеров на примере трех малых площадок и линейного профиля / А.П. Сергеев, В.Н. Чуканов // В сб. Урал. Радиация. Реабилитация. Екатеринбург: УрО РАН, 2004.

## THE IMITATING APPROACH TO THE DECISION OF PROBLEMS OF ADMIXTURES DISTRIBUTION

© 2010 S.V. Gubarev<sup>1</sup>, D.B. Berg<sup>2,3</sup>, A.P. Sergeev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University, Ekaterinburg

<sup>2</sup> Alexander Bogdanov's International Institute, Ekaterinburg

<sup>3</sup> Institute of Industrial Ecology UB RAS, Ekaterinburg

In article the imitating approach to modeling of pollution distribution from a point source of the set power is analyzed. Mathematical descriptions of the created rules of cellular automatic device are resulted. The example of calculation of a field of surface pollution received as a result of imitating modeling is shown. The result of modeling is compared to calculation by technique ОНД-86. The example of real pollution profile, received during scheduled taking probes of snows near the stone career is resulted.

Key words: *mathematical modeling, cellular automatic devices, imitating modeling*

Semen Gubarev, Post-graduate Student. E-mail: mnogono@gmail.com

Dmitriy Berg, Doctor of Physics and Mathematics, Senior Research

Fellow. E-mail: bergd@mail.ru

Alexander Sergeev, Candidate of Physics and Mathematics, Chief of the Laboratory. E-mail: sergeev@ecko.uran.ru