УДК 519.876.5

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ СКОРОСТИ ВЕТРА НА РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЕ ПОЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОТ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА

Губарев С.В.

Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, e-mail: mnogono@gmail.com

Проведено компьютерное исследование для определения степени влияния временной динамики скорости ветра на формирование поля поверхностного загрязнения на протяжении десяти дней с учетом розы ветров исследуемой местности. Рассчитана вероятностная функция распределения скорости ветра на высоте 121 метров исходя из данных натурных наблюдений. Для моделирования процессов массопереноса загрязняющего вещества в приповерхностном слое атмосферы предложена альтернативная имитационная модель на базе метода клеточных автоматов. В результате компьютерного эксперимента определена относительная ошибка моделирования в случае аппроксимации динамики скорости ветра вероятностной функцией и в случае постоянной скорости ветра. Отсутствие статистических данных о динамике скорости ветра на временном интервале моделирования приводит к 60% ошибке при расчете концентрации результирующего поверхностного загрязнения при прочих равных условиях.

Ключевые слова: клеточный автомат, имитационное моделирование, компьютерное моделирование процессов массопереноса загрязняющих веществ в атмосфере

EFFECTS OF WIND SPEED DYNAMICS ON THE RESULTING FIELD OF SURFACE POLLUITION ON SURFACE POLLUTION CONGLOMERATION FROM POINT SOURCE OF POLLUTION

Gubarev S.V.

Institute of Industrial Ecology, the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, e-mail: mnogono@gmail.com

Computational modeling was performed to determine a degree with which ten days dynamics of wind speed affect the surface pollution field formation considering the wind pattern of the area in question. Wind speed distribution function was determined for the height equal to 121 meters based upon observations data. Alternative computational model based on cellular automata method was proposed for modeling pollutants mass-transfer in a near-surface atmospheric layer. As a result of computational experiment modeling relative error for modeling was determined for the cases of approximating wind speed dynamics with distribution function, and for constant wind speed. It was found that the lack of statistic data on wing speed dynamics for the modeling timeframe causes 60% error in computing concentration of resulting surface pollution OTE.

Keywords: cellular automata, imitation modeling, computer modeling of atmospheric processes and pollutants mass-transfer in atmosphere

Как показывают экспериментальные наблюдения, метеорологические параметры существенно изменяются на протяжении суток и напрямую влияют на характер распространения загрязнений в атмосфере. В связи с этим при моделировании распространения примесей загрязняющих веществ от непрерывных источников загрязнений необходимо учитывать изменение метеорологических параметров во времени. Вертикальная диффузия турбулентных движений масс воздуха, направление и скорость ветра непрерывно и существенно изменяются на протяжении суток. Как правило, для анализа степени загрязнения используются стационарные модели распространения загрязнений [6, 7], не учитывающие изменение метеорологических параметров во времени. Как показано, учет временных флуктуаций атмосферных параметров в приповерхностном слое атмосферы позволит существенным образом уменьшить погрешность при расчете полей поверхностных загрязнений.

Проведен ряд компьютерных экспериментов по исследованию накопления загрязняющего вещества за десятидневный период подстилающей поверхностью от непрерывного высотного точечного источника загрязнения высотой 107 метров. Цель исследования заключалась в определении степени влияния динамических изменений атмосферных параметров на результирующее поле поверхностного загрязнения за время моделирования, а также определении наилучшего метода аппроксимации скорости ветра для достижения наименьшей ошибки моделирования. Моделирование осуществлялось с помощью разработанного программного комплекса имитационного моделирования, созданного на основе метода клеточных автоматов [1, 2, 3].

Комплекс программ состоит из набора модулей (программ), по отдельности обеспечивающих расчеты массопереноса в результате моделирования следующих физических процессов:

• эмиссии загрязняющих веществ;

• конвективного массопереноса вдоль направления ветра;

• седиментации (гравитационного осаждения, сухого осаждения);

• турбулентной диффузии;

• вторичного ветрового массопереноса;

• адсорбции молекул воды на поверхности аэрозольных частиц;

Основная особенность реализации указанного программного комплекса заключается в применении метода объединения правил клеточного автомата для моделирования комплексного процесса массопереноса загрязняющих веществ в атмосфере. Правила объединяются с учетом их интенсивности влияния на процесс рассеивания массопереноса

Основным показателем интенсивности правила КА является его характерное время, рассчитанное исходя из выделенных безразмерных комплексов атмосферных процессов (3, 4, 5). Результатом объединения правил являются рассчитанные вероятности срабатывания каждого правила КА.

$$T \cdot P = b \qquad (1)$$

$$T = \begin{pmatrix} t_{td} & -t_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -t_u & t_{sed} & 0 & 0 \\ 0 & -t_u & 0 & t_u^* & 0 \\ 0 & -t_u & 0 & 0 & t_{gid} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix};$$

$$P = \begin{pmatrix} P_{td} \\ P_u \\ P_{sed} \\ P_u^* \\ P_{gid} \end{pmatrix}; \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \qquad (2)$$

$$t_{td} = P_{td} \cdot D_{ca} \cdot L^2/(D \cdot L_{ca}{}^2); \qquad (3)$$

$$t_u = P_u \cdot L \cdot u_{ca}/(L_{ca} \cdot u); \qquad (4)$$

$$t_{sed} = P_{sed} \cdot \omega_{ca} \cdot L/(L_{ca} \cdot \omega); \qquad (5)$$

$$t_{gid} = \frac{\rho RT(d^2 - d_0^2)}{8DMp_\infty(1-S)}, \qquad (6)$$

где T – матрица характерных времен процессов; P – искомая матрица вероятностей; b – вектор свободных коэффициентов; t_{td} – характерное время процесса диффузии; P_{td} – вероятность правила диффузии КА; L и L_{ca} – размер моделируемой области пространства в метрах и размер вектора состояний клеточного автомата соответственно; D_{ca} – безразмерный коэффициент диффузии клеточного автомата; D – коэффициент диффузии м^2/с; t_u – характерное время процесса ветрового массопереноса; P_u – вероятность правила ветрового массопереноса КА; u_{ca} – безразмерная скорость ветрового массопереноса клеточного автомата; u – средняя скорость ветра м/с; t_{sed} – характерное время процесса гравитационного осаждения; ω_{ca} – безразмерная скорость гравитационного осаждения клеточного автомата; ω – средняя скорость гравитационного осаждения м/с; t_{gid} – характерное время роста зародыша в процессе гидратации молекул воды; d_0 – окончательный диаметр капли; d – начальный диаметр капли; ρ – плотность воды; D – молекулярный коэффициент диффузии молекул воды; p_∞ – давление водяных паров вдали от капли; S – степень перенасыщения.

Для данного исследования была создана имитационная модель на базе программного комплекса, имитирующая действие существующего источника загрязнения – трубы высотой 107 метров медеплавильного завода города Карабаш Челябинской области. Моделирование производилось в предположении ровной подстилающей поверхности и в предположении поглощения загрязняющего вещества на высоте $z = 0$. Имитационная область моделирования 6000×6000×1000 метров, с разрешением матрицы клеточного автомата 60×60×10 метров на клетку. Поставленная задача может быть описана следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x_i} + v\frac{\partial C}{\partial x_2} + \omega\frac{\partial C}{\partial x_3} = \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} D_i \frac{\partial C}{\partial x_i} + f_S;$$

$$D_3 \frac{\partial C}{\partial x_3} + \omega C = \beta C; \quad \beta = \infty, \qquad (7)$$

где C – концентрация примеси; t – время, прошедшее с момента выброса; u, v, ω – декартовые средние скорости сноса примеси; D_i – вектор коэффициентов турбулентной диффузии, $f_S = f(x_1, x_2, x_3, t)$ – функция, описывающая действие источников загрязнения; β – некоторая постоянная размерности скорости. Согласно последним данным, после внедрения ряда очистительных сооружений на медеплавильным заводе результирующая мощность выбросов пыли в атмосферу оценивается $Q = 50$ т/год [4].

Как показывают данные экспериментальных наблюдений, поле поверхностного загрязнения, полученное с помощью созданной имитационной модели [2, 5], верно характеризует реальную картину загрязнений на данной территории. В связи с этим возникла задача исследовать изменение

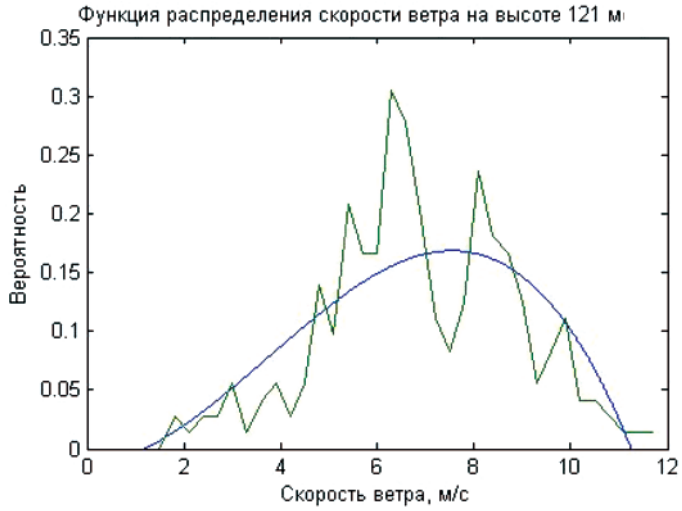
результирующего поля поверхностного загрязнения в зависимости от входных параметров модели, а именно аппроксимации функции скорости ветра от времени.

Подробные данные о характерном состоянии атмосферы на высоте 121 м были получены сотрудниками обнинской метеорологической башни – уникального научного сооружения высотой 310 м. Экспериментальные данные скорости и направления ветра записываются каждый час и усредняются за 20-минутный промежуток времени, процесс сбора информации полностью автоматизирован. При анализе архивов экспериментальных данных за 10-дневный промежуток времени (с 02.02.2011 по 12.02.2011) была найдена функция распределения скорости и направления ветра рис. 1 а, б:

$$P(u) = -0{,}00082u^3 + 0{,}00918u^2 + 0{,}00133u - 0{,}01314. \quad (8)$$

Хотя полученные данные по состоянию атмосферы территориально относятся к другой области, важно получить представление о характерном поведении скорости ветра на высоте порядка 100 метров. С другой стороны, рельеф местности обеих территорий принципиально не отличается, в связи с этим можно сделать предположение, что характерная вероятностная функция распределения скорости ветра на территории города Карабаш Челябинской области будет аналогична.

а



б

Рис. 1. Данные наблюдений, полученные с обнинской метеовышки:
а – подробные данные динамики поля скорости ветра; б – функция распределения вероятности скорости ветра на высоте. Экспериментальные данные аппроксимированы полиномом 3 степени

В качестве ожидаемого результирующего поля поверхностного загрязнения была принята картина, полученная в результате моделирования первой имитационной моделью рис. 2а при использовании подробных данных динамики изменения скорости ветра от времени (рис. 1а).

Как правило, при использовании стандартной Гауссовой модели рассеивания примесей от точечного источника скорость ветра принимают постоянной и равной среднестатистической скорости на исследуемой территории. В связи с этим вторая имитационная модель построена с учетом среднестатистической скорости ветра за 10-дневной промежуток (рис. 2б). Среднестатистическая скорость ветра составила 6,9 м/с. Относительное изменение суммарного уровня концентрации загрязняющего вещества на поверхности составило δ_{12} = 61,2 % (9) от ожидаемого (рис. 2а, в).

$$\delta_{12} = \frac{\left|\sum_{x,y} C_1(x,y) - \sum_{x,y} C_2(x,y)\right|}{\sum_{xy} C_1(x,y)}, \quad (9)$$

где C_1, C_2 – расчетное распределение количества загрязняющего вещества, полученное в результате работы первой и второй имитационной модели соответственно. Аналогичная формула применялась для расчета δ_{13} полученного в результате работы первой и третьей имитационной модели.

Третья имитационная модель была построена на основе найденной вероятностной функции распределения скорости ветра (1) (рис. 1б). Результирующее поле поверхностного загрязнения представлено на рис. 3в. Относительное изменение суммарного уровня концентрации загрязняющего вещества на поверхности составило δ_{13} = 0б5 % (9) от ожидаемого (рис. 3а, б).

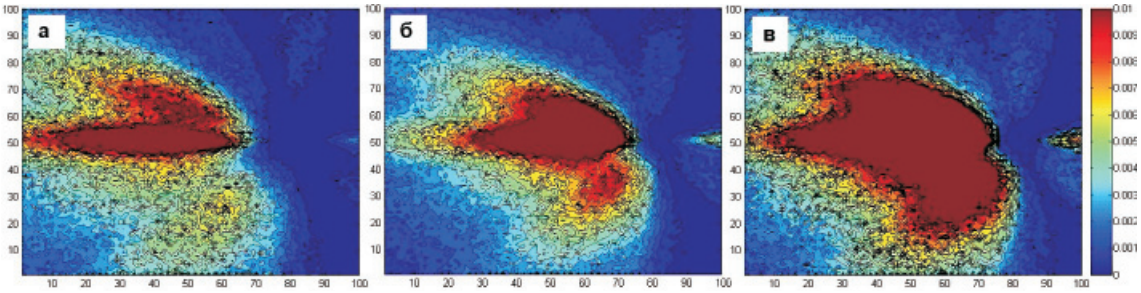


Рис. 2. Расчетные поля концентрации загрязняющего вещества. Моделирование производилось на основе: а – подробных данных о динамике скорости ветра; б – вероятностной функции скорости ветра; в – постоянной скорости ветра. Концентрация представлена в кг/м^2. Масштаб – 60 метров на клетку

Согласно полученным результатам (рис. 2) флуктуации атмосферных параметров играют существенную роль при распространении загрязняющих веществ и формировании полей поверхностных загрязнений. Подробные метеорологические данные о состоянии атмосферы, как правило, не доступны для исследуемой территории, с другой стороны, накопленные архивные данные динамики атмосферных параметров исследуемой местности позволяют рассчитать статистические вероятностные функции.

Применение вероятностной функции динамики поля скорости ветра позволяет приблизиться к ожидаемому результату и относительное изменение суммарной концентрации загрязняющего вещества в этом случае составляет δ_{13} = 0,5 % от ожидаемого (9).

При использовании в модели средней скорости ветра относительное изменение суммарной концентрации загрязняющего вещества на подстилающей поверхности составило δ_{12} = 61,2 % от ожидаемого (9).

Работа выполнена при поддержке гранта «12-2-3-010-АРКТИКА» Методические основы и концепция интегральной системы управления качеством окружающей среды ЯНАО.

Список литературы

1. Губарев С.В. Имитационный подход к решению задач распространения примесей / С.В. Губарев, Д.Б. Берг, А.П. Сергеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12. – С. 2112–2115.

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. Губарев С.В. Две модели для исследования ветрового вторичного массопереноса / С.В. Губарев, К.А. Беклемишев, Д.Б. Берг // Информационно-математические технологии

в экономике, технике и образовании: сб. науч. тр. – Екатеринбург, 2008. – С. 196–201.

4. Урал Бизнес Консалтинг [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://archive.urbc.ru/112850-post112850.html (дата обращения 23.08.2012).

5. 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. – С. 91–98.

6. Materials of IAEA Meeting, 1987, Chapter 3 p. 26.

7. Sun W.Y., Chang C.Z. Diffusion model for a convective layer. Part 2: Plume released from a continuous point source. J. Climate Appl. Meteorol. – 1986. – vol. 25. – № 10. – P. 1454–1463.

References

1. Gubarev S.V., Berg D.B., Sergeev A.P. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, 2010, no. 12, pp. 2112–2115.

2. Gubarev S.V., Berg D.B., Beklemishev K.A. Materialy Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii «gornye territorii – jekologicheskie problemy gorodov» (Proc. Int. Scientific Conference «Mountain areas – urban environmental problems»). Yerevan, 2007, pp. 22–27.

3. Gubarev S.V., Beklemishev K.A., Berg D.B. Sbornik nauchnyh trudov «Informacionno-matematicheskie tehnologii v jekonomike, tehnike i obrazovanii» (Proc. Scientific Works «Information technology and mathematics in economics, technology and education»). 2008. Yekaterinburg. Ural State Technical University – Ural Polytechnic Institute. pp. 196–201.

4. Chukanov V.N., Sergeev A.P., Ovchinnikov S.M., Medvedev A.N. Defektoskopija. Yekaterinburg. 2006. no. 9. pp. 91–98.

5. Ural Biznes Konsalting (Ural Business Consulting) Avaible at: http://archive.urbc.ru/112850-post112850.html (accessed 23 August 2012)

6. Materials of IAEA Meeting, 1987, Chapter 3 pp. 26.

7. Sun W.Y., Chang C.Z. Diffusion model for a convective layer. Part 2: Plume released from a continuous point source. J. Climate Appl. Meteorol. 1986, vol. 25, no 10, pp. 1454–1463.

Рецензенты:

Никонов О.И., д.ф.-м.н., профессор, директор Департамента бизнес–информатики и математического моделирования Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург;

Берг Д.Б., д.ф.-м.н., профессор кафедры анализа систем и принятия решений Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург.

Работа поступила в редакцию 26.10.2012.