

УДК 504.064.36

И. К. ВАСИЛЬЕВА, А. С. НЕЧАУСОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", Украина

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ АТМОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ

Рассмотрены методы расчета концентраций загрязняющих веществ в атмосфере. Предложена вероятностная модель на основе нормального распределения и S_L -распределения Джонсона, позволяющая учитывать нестационарный характер факторов, формирующих поля концентраций. Разработанная модель учитывает пространственную локализацию источников загрязнения, атрибуты источников, характеризующие физические условия поступления загрязняющих веществ в атмосферу, скорость и направление ветра, атмосферную диффузию и время эмиссии. Представлены результаты моделирования полей концентраций атмосферных примесей для непрерывно и периодически функционирующего точечного источника загрязнений при нестабильных метеорологических условиях.

Ключевые слова: *загрязнение атмосферы, вероятностная модель, нестационарный процесс, турбулентная диффузия, время транспорта, поле концентраций.*

Введение

Негативное влияние производственных объектов на окружающую среду и их потенциальная экологическая опасность требуют постоянного контроля компонентов природной среды, в частности, мониторинга качества атмосферного воздуха и прогнозирования уровня его загрязнения выбросами промышленных предприятий. Для обеспечения мониторинга в развитых странах созданы автоматизированные системы контроля загрязнения воздуха (АСКЗВ), которые осуществляют автоматическое наблюдение и регистрацию концентраций загрязняющих веществ (ЗВ), выполняют анализ полученной информации для определения фактического состояния загрязнения воздушного бассейна и прогноза уровня его загрязнения, а также разрабатывают меры по улучшению экологической ситуации. АСКЗВ включают сотни автоматических контрольно-измерительных пунктов, определяющих, кроме концентраций ЗВ (SO_2 , CO , NO_x , O_3 , C_mH_n , H_2S , NH_3 и др.), значения влажности, температуры, солнечной радиации, направления и скорости ветра.

Оценка действующих сетей мониторинга атмосферы, проводимая регулярно независимыми экспертами ООН, показывает, что в ряде стран Восточной Европы их качество не соответствует международным стандартам. С целью модернизации таких сетей Рабочей группой по мониторингу окружающей среды ЕЭК ООН рекомендуется внедрение автоматизированных систем контроля и создание единых data-центров, предназначенных для сбора, хранения и обобщения данных наблюдений [1].

В соответствии с международными рекомендациями к построению информационной системы экологического мониторинга выделяют следующие стадии автоматизированной обработки экологической информации:

- прием и программный разбор (парсинг) данных наблюдений субъектов мониторинга, поступающих в региональный центр данных по одному из способов: импорт данных из файлов в формате АСОИЗА [2], получение данных в реальном времени от автоматизированных постов, ручной ввод;
- обобщение, систематизация, сохранение полученных результатов в базе данных;
- прогноз распространения примеси в соответствии с алгоритмами, полученными на этапе анализа пространственно-временных закономерностей;
- визуализация и публикация в режиме online результатов прогноза на экологических сайтах или общественных информационных порталах;
- репликация экологической информации на сервера верхнего уровня с использованием произвольных XML-схем передачи данных.

Таким образом, в состав системы экологического мониторинга регионального уровня обязательно должна входить подсистема моделирования и прогнозирования, которая позволяет выявлять очаги загрязнения и вырабатывать адекватные управляющие воздействия на технологическом и экономическом уровнях [3].

Целью работы является разработка модели полей концентраций ЗВ, учитывающей нестационарность атмосферных процессов и конечное время действия источников загрязнения.

1. Модели для определения полей концентраций загрязняющих веществ

В задачах оценки загрязненности атмосферы важным вопросом, наряду с диагнозом текущего состояния, является прогноз концентраций ЗВ; эта информация необходима для принятия управляющих решений по экологической обстановке и анализа техногенных рисков. С учетом того, что информация, необходимая для экологической оценки потенциального риска, содержит в себе неопределенность, обусловленную, в частности, погрешностями измерений, недостоверностью и/или недостаточностью экспериментальных данных, отсутствием долговременных рядов наблюдений, пространственной вариабельностью большинства химических параметров окружающей среды, особое внимание уделяется методам математического моделирования. На основе таких моделей возможно построение полей концентраций ЗВ, прогнозирование и экономическая оценка возможных последствий загрязнений, разработка научно обоснованных методов долгосрочного планирования мероприятий, направленных на сокращение выбросов вредных веществ. Модели, используемые для оценивания величины концентраций ЗВ в атмосфере, различаются способом описания диффузионных процессов и способом задания поля скорости ветра. Эти различия могут играть значительную роль в формировании расчетных значений концентраций примеси на различных расстояниях от источника и в различных метеорологических условиях, определяя, таким образом, характерную область применимости той или иной модели. Данные измерений уровней концентраций ЗВ в точках с известными пространственными координатами при наличии достоверных сведений о метеорологических особенностях и параметрах выбросов позволяют уточнить результаты расчетов рассеивания примесей и скорректировать параметры используемых математических моделей с целью повышения их точности и адекватности [4].

В настоящее время существует ряд методик и программных средств, позволяющих определять поля концентраций ЗВ по результатам решения уравнений, описывающих с той или иной степенью приближения рассеяние примесей в атмосфере [5, 6]. Основными подходами для количественного описания данного процесса являются:

- гауссовские (дисперсионные) модели;
- модели рассеяния, базирующиеся на интегральных законах сохранения либо в облаке в целом (залповый выброс), либо в поперечном сечении облака (длительный выброс); в отдельную подгруппу выделяют модель «тяжелого газа»;
- модели или методы прямого численного мо-

делирования, построенные на численном решении системы уравнений газодинамики.

Гауссовские модели описывают пространственно-временное изменение концентрации газа. Для практической реализации в них вводятся эмпирические коэффициенты, описывающие атмосферную турбулентность. Данные модели учитывают только два процесса, происходящие с выбросом в атмосфере, – перемещение в поле ветра и рассеяние за счет атмосферной турбулентности. Приемлемую точность оценок эти модели дают для тех зон, где доминируют указанные процессы: либо на большом удалении от источника выброса, либо во всем диапазоне расстояний, но при слабом ветре [5].

В случае определения зон загрязнения примесью с плотностью выбрасываемого вещества, существенно превышающей плотность воздуха рекомендуют использовать модели «тяжелого газа», в которых учитываются архимедовы силы и законы сохранения массы и энергии на начальной стадии формирования облака [5].

Наиболее перспективным направлением для прогнозирования полей концентраций ЗВ является разработка гибридной методики на основе численного решения уравнений массопереноса в пределах исследуемой области с учетом нестационарных условий формирования и рассеяния примеси.

В работе [7] авторами предложена стационарная вероятностная модель для расчета концентрации ЗВ в атмосфере, учитывающая состояние атмосферы, физические свойства выбрасываемых веществ, высоту и диаметр источника выброса, расположение источников. Стационарная задача описывает частный процесс переноса ЗВ с неизменными во времени входными данными. Однако набор таких частных решений, соответствующий различным стационарным входным данным задачи, может использоваться и при описании более сложных физических ситуаций. Пусть в различные периоды времени в атмосфере в данном регионе реализуются определенные типы движений воздушных масс, которые за период характерного времени существования можно считать стационарными. После каждого такого периода происходит перестройка движения воздушных масс и наступает новое стационарное состояние. Поскольку перестройка циркуляций происходит за период намного короче времени существования i -го типа движений Δt_i , то можно предположить, что перемена типов движений происходит мгновенно. Тогда решение задачи о среднем за период $T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$ распределении примеси находят в виде линейной комбинации [8]:

$$\bar{f}_C(\bar{x}) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n f_C(\bar{x} | \Delta t_i) \Delta t_i. \quad (1)$$

Время, необходимое для установления стационарного распределения концентрации от точечного источника легкой примеси, определяется условием $t \geq x/u$ (в предположении постоянной скорости ветра u) [9].

2. Анализ нестационарных полей концентраций ЗВ

Перенос загрязнений в атмосфере обуславливается двумя составляющими атмосферного движения: полем среднего ветра, переносящим загрязнение от одной точки к другой, и турбулентными движениями, которые рассеивают загрязнения относительно некоторого центра. Даже в безветренную погоду атмосфера является турбулентной средой, где спонтанно образуются мелкомасштабные флуктуации (вихри); это обуславливает довольно сложное распределение аэрозолей в значительной окрестности от источника выбросов. Если скорость потока воздушных масс u равна нулю, то в результате диффузионного процесса устанавливается распределение, экспоненциально и симметрично убывающее по направлениям от точки \bar{x}_0 [8]. При $u > 0$ диффузионное рассеяние ЗВ сопровождается их сносом в направлении ветра. Таким образом, при изучении процесса распространения пассивных примесей в атмосфере большое значение имеет согласование адвективно-конвективных процессов переноса с процессами диффузии ЗВ. Совместное моделирование этих двух факторов позволит получить адекватное описание физических процессов распространения примесей в атмосфере.

Концентрация от группы источников рассчитывается на основе суперпозиции полей концентрации от отдельных источников. В случае близко расположенных источников их можно свести к одной точке. Если при этом выброс осуществляется из N труб с одинаковыми параметрами, то суммарное значение концентрации и опасная скорость ветра определяются по формулам для одиночного источника в предположении, что Q – суммарный выброс из N труб. Если источники расположены близко друг к другу, но имеют разные параметры выбросов или группируются вдоль некоторой линии, то распределение концентрации от суммы источников находят (при $z = \text{const}$) как

$$C_{\Sigma}(x_i, y_j) = \sum_{n=1}^N C_n(x_i, y_j).$$

При оценке наибольшей концентрации от рассредоточенных по территории источников возникает необходимость построения поля концентраций с учетом пространственно-временной неустойчивости факторов, влияющих на процессы рассеяния ЗВ в атмосфере. С подобными проблемами сталкиваются

и при экспресс-оценке последствий от аварийного загрязнения атмосферы; при этом часто исходят из того, что источник загрязнения является точечным и функционирует в течение ограниченного, обычно короткого периода времени. В этих случаях для прогноза последствий предпочтительно использовать аналитические выражения динамического концентрационного поля, основанные на вероятностных представлениях о его формировании [10]. Концентрационное поле описывается с помощью двух соотношений. Первое относится к периоду времени, $T < t \leq 0$, когда источник еще функционирует:

$$C(\bar{x}, t) = \int_0^t m(t^*) \cdot f_C(\bar{x}, t | \bar{x}_0, t^*) dt^*, \quad t \in [0, T),$$

где \bar{x} – радиус-вектор текущей точки в загрязненном пространстве, в котором в момент времени $t = 0$ отсутствует загрязнитель;

$m(t^*)$ – интенсивность эмиссии загрязнителя из точки \bar{x}_0 , начиная с момента времени $t = 0$;

$f_C(\bar{x}, t | \bar{x}_0, t^*)$ – функция плотности вероятности перехода частиц загрязнителя, находящихся в момент времени t^* в точке \bar{x}_0 , в окрестность точки \bar{x} в момент времени t .

Во второй период времени $t \geq T$, когда источник уже не функционирует, а происходит лишь рассеивание загрязнителя по всему пространству (включая и источник), концентрационное поле выражается соотношением

$$C(\bar{x}, t) = \int_0^T m(t^*) \cdot f_C(\bar{x}, t | \bar{x}_0, t^*) dt^*, \quad t \in [T, \infty).$$

Функция плотности вероятности в случае, когда загрязняемое пространство представляет собой полупространство $x_3 \geq 0$ с границей, абсолютно непроницаемой для загрязнителя, имеет вид

$$f_C(\bar{x}, t | \bar{x}_0, t^*) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3} \times \\ \times \exp \left\{ - \left[\frac{(x_1 - x_{10} - u_1(t - t^*))^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(x_2 - x_{20})^2}{2\sigma_2^2} \right] \right\} \times (2) \\ \times \left\{ \exp \left[- \frac{(x_3 - x_{30})^2}{2\sigma_3^2} \right] + \exp \left[- \frac{(x_3 + x_{30})^2}{2\sigma_3^2} \right] \right\},$$

где σ_i^2 , $i = 1, 2, 3$ – дисперсии, характеризующие рассеяние облака вдоль координатных осей (обычно описываются эмпирическими формулами, в которых в качестве аргумента фигурирует величина $t - t^*$).

Предполагается, что воздушная среда перемещается вдоль оси x_1 со скоростью u_1 .

Выражение (2) представляет собой нестационарную Гауссову модель; при этом предполагается, что распределение частиц в струе или облаке близко к нормальному, что хорошо согласуется с данными о рассеянии ЗВ в вертикальной плоскости и по оси

Y (перпендикулярно осевой линии струи). Однако профиль распределения концентрации по оси X (вдоль направления ветра) является асимметричным и плохо аппроксимируется гауссоидой. Характерной особенностью распределения наземной концентрации C по оси X является наличие ее максимума C_m на расстоянии x_m от источника; при одинаковых параметрах выбросов максимальная приземная концентрация примеси от более высокого источника меньше и наблюдается на большем расстоянии от источника. С учетом этого, в работе [7] была предложена мультикомпонентная модель, основанная на двух видах распределений – нормальном (для Y и Z) и S_L -распределении Джонсона (X):

$$f_C(x, y, z) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi^3\sigma_y\sigma_z}} \cdot \frac{\eta}{(x-x_0)} \times \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\gamma + \eta \ln\left(\frac{x-x_0}{\lambda}\right)\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_y}\right)^2\right]\right\} \times \left\{\exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right\}, \quad (3)$$

где x_0, y_0, z_0 – пространственные координаты виртуального точечного источника загрязнения;

$x_0 \equiv \varepsilon$ и λ ($\lambda > 0$) – параметры масштаба, η и γ – параметры формы S_L -распределение Джонсона;

$z_0 \equiv H$ – эффективная высота (сумма геометрической высоты трубы h и начального подъема струи Δh).

В модели (3) параметры S_L -распределения Джонсона определяются по эмпирическим зависимостям вида

$$\theta_j^* = \Psi_j[u|\bar{p}_j(w_0)] + a_j(u, w_0) + b_j(u, w_0)\Delta T, \quad (4)$$

где $\bar{\theta} = \{\lambda, \eta, \gamma\}$ – вектор параметров S_L -распределения Джонсона;

u – горизонтальная скорость ветра;

w_0 – скорость газов на выходе из источника;

ΔT – перегрев газов относительно окружающего воздуха;

$\Psi_j(\bullet)$ – нелинейная функция, адекватно описывающая поведение j -го параметра $\theta_j^*(u)$;

$\bar{p}_j(w_0)$ – вектор коэффициентов $\Psi_j(\bullet)$;

$a_j(\bullet)$ и $b_j(\bullet)$ – нелинейные функции коэффициентов смещения и наклона, определяющие линейную зависимость $\theta_j^*(\Delta T)$.

Рассеяние ЗВ по направлению ветра (σ_x) связано с параметром масштаба λ .

Значения среднеквадратических отклонений (СКО) σ_z , характеризующих рассеяние ЗВ в вертикальной плоскости, находятся по эмпирической

формуле

$$\sigma_z(x, k_A) = c(k_A) \cdot x^{d(k_A)}, \quad (5)$$

где k_A – класс устойчивости атмосферы (A...F).

Для определения значений σ_y в [7] предложена модель вида

$$\sigma_y(x, u) = \frac{p_0(x)}{u + p_1} = \frac{a + b \cdot x}{u + p_1}. \quad (6)$$

Учет направления ветра φ в модели (3) осуществляется поворотом системы координат вокруг точки с координатами источника выброса (x_0, y_0) на величину угла φ :

$$\begin{cases} x = \cos(\varphi)(x - x_0) - \sin(\varphi)(y - y_0); \\ y = \cos(\varphi)(x - x_0) + \sin(\varphi)(y - y_0). \end{cases}$$

Поле концентраций ЗВ (легкой примеси) для непрерывного точечного источника находится как

$$C(x, y, z) = Qf_C(x, y, z), \quad (7)$$

где Q – мощность выброса.

Для периодических источников выбросов, а также для учета нестационарности атмосферных процессов, формирующих поля концентраций, предлагается в (3) заменить СКО σ_y среднегеометрической суммой двух величин

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{y1}(x, u)^2 + \sigma_{y2}(t, k_A)^2}, \quad (8)$$

где $\sigma_{y1}(x, u)$ характеризует рассеяние в установившемся режиме (когда источник еще функционирует); при этом можно считать, что σ_{y1} зависит от расстояния x от источника до центра клуба облака, которое линейно связано со временем транспорта загрязнителя, а также от горизонтальной скорости ветра u , определяющей характер переноса ЗВ в горизонтальном направлении;

$\sigma_{y2}(t, k_A)$ – СКО, определяющее рассеяние в период диффузионного рассеяния (когда источник уже не работает); σ_{y2} зависит от интервала времени, прошедшего с момента прекращения эмиссии загрязнителей, и класса устойчивости атмосферы (способности атмосферы рассеивать загрязнители).

Для практических расчетов $\sigma_{y2}(t, k_A)$ можно использовать формулу аналогичную (5):

$$\sigma_{y2}(t, k_A) = a(k_A) \cdot (vt)^{b(k_A)}, \quad (9)$$

где коэффициент v характеризует скорость горизонтального расширения струи в направлении, перпендикулярном направлению движения; при $u > 0$ величина v пропорциональна скорости ветра:

$$v = \alpha u, \quad 0 < \alpha < 1.$$

Значения коэффициентов a, b, c, d в зависимости от класса устойчивости атмосферы ($z = 0,1$ м, $x \in [10^2, 10^4]$ м, $h < 20$ м) даны в табл. 1 [9].

Таблица 1

Параметры расчета σ_z и σ_{y2}

Класс устойчивости	A	b	c	d
Очень нестабильный	0,527	0,865	0,28	0,90
Нестабильный	0,371	0,866	0,23	0,85
Слабонестабильный	0,209	0,897	0,22	0,80
Нейтральный	0,128	0,905	0,20	0,76
Стабильный	0,098	0,902	0,15	0,73
Очень стабильный	0,065	0,902	0,12	0,67

На рис. 1 показаны сечения (в плоскости, перпендикулярной направлению ветра) концентрации ЗВ в облаке по времени. Снижение пиковой приземной концентрации в центре облака со временем (расстоянием) иллюстрирует рис. 2.

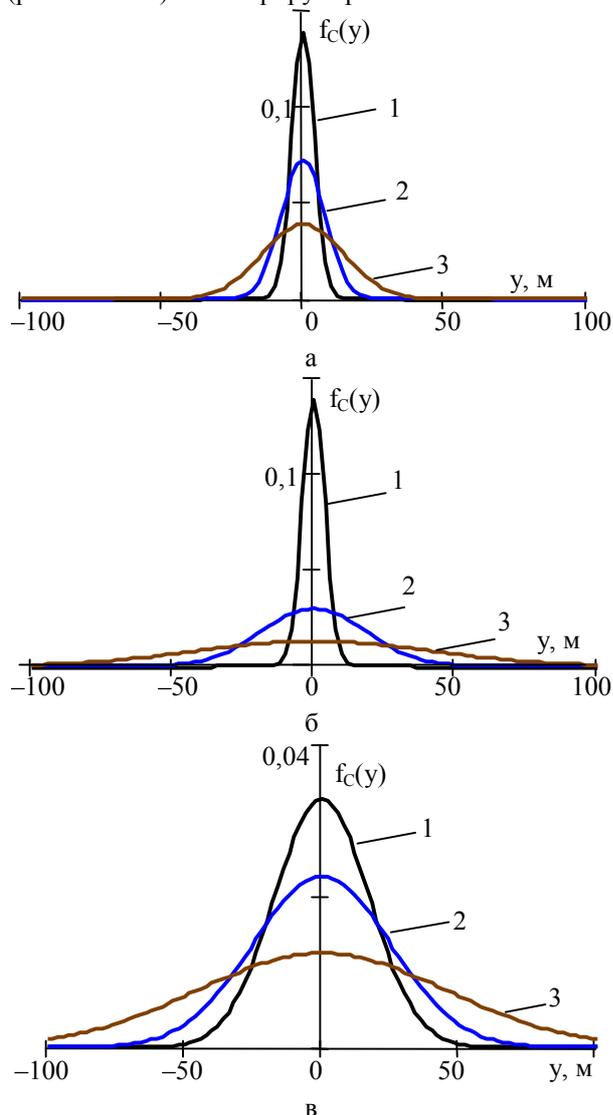


Рис. 1. Зависимость распределения концентраций ЗВ по оси Y от времени (1 – в начальный момент $t = 0$, 2 – через 20 мин, 3 – через 1 час), от класса устойчивости атмосферы k_A и скорости ветра u :
 а – $u = 10$ м/с, $k_A = F$; б – $u = 1$ м/с, $k_A = F$;
 в – $u = 1$ м/с, $k_A = D$

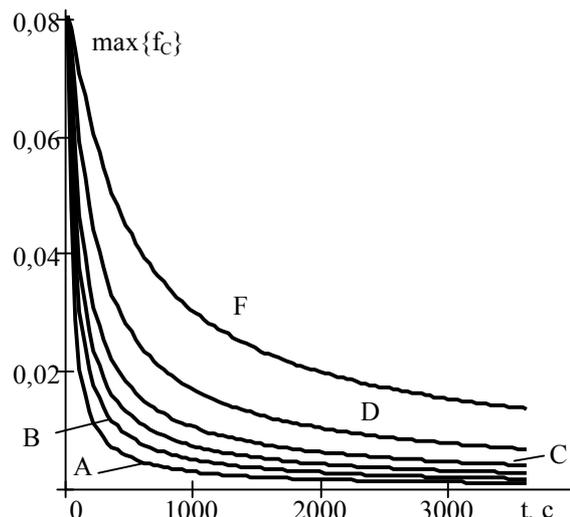


Рис. 2. Изменение уровня концентраций ЗВ по оси Y ($x = 50$ м, $u = 5$ м/с) с течением времени для различных классов устойчивости атмосферы

При заданных (постоянных) характеристиках источника, каждому конкретному набору случайных значений метеофакторов $\{u, \varphi, T_A, k_A\}$ соответствует определенное стационарное поле концентраций ЗВ. Изменение значений метеофакторов вызывает перераспределение ЗВ в атмосфере; по истечении некоторого времени устанавливается новое стационарное поле концентраций, представляющее собой суперпозицию полей, сформировавшихся за текущих и предыдущие интервалы времени, на протяжении которых метеорологические условия можно считать стационарными.

Для каждого такого интервала времени t_j распределение концентрации по оси OX определяется вектором параметров S_L -распределения Джонсона $\bar{\theta}|\varphi_j, u_j, T_{AJ}$, распределение по оси OZ определяется величиной СКО распределения Гаусса $\sigma_z|\varphi_j, k_{AJ}$, где $\varphi_j, u_j, T_{AJ}, k_{AJ}$ – направление и скорость ветра, температура воздуха и класс устойчивости атмосферы в текущем интервале времени t_j .

Расcеяние по оси OY зависит от текущих и предыдущих метеорологических условий: $\sigma_{y1}|\varphi^*, u_1, \sigma_{y2}|\alpha u_j(t_j - t_1), k_{AJ}$, где φ^* – среднее взвешенное направление ветра:

$$\varphi^* = \arctg\left(\frac{u_1 \cos \varphi_1 + u_j \cos \varphi_j}{u_1 \sin \varphi_1 + u_j \sin \varphi_j}\right), \quad (10)$$

где $I = 0 \dots j$ – номера предыдущих интервалов времени.

Таким образом, результирующее поле концентраций с учетом пространственно-временной нестациональности факторов можно определить как

$$C(\bar{x}, t_j) = \sum_{I=0}^j \Delta t_I Q \times f_C(\bar{x}, t_{j-I} | u_I, u_j, \varphi_I, \varphi^*, T_{AI}, k_{AI}, k_{AJ}), \quad (11)$$

где Δt_1 – длительность I-го временного интервала, на протяжении которого факторы, формирующие распределение концентраций, являются стабильными; для автоматизации вычислений можно задавать выборку данных из 24 точек (сутки) с шагом 1 час.

Данный подход можно использовать для описания полей концентраций, порождаемых источником, функционирующим кратковременно на интервале $[0, T]$. В таком случае в пределах этого временного интервала концентрации рассчитываются при усредненном на $[0, T]$ значении мощности выброса источника Q ; после этого периода времени ($t \geq T$), когда происходит рассеивание загрязнителя в атмосфере, текущее значение $Q(t)$ устанавливается равным нулю, а значения концентраций $C(\bar{x}, t_1)$ каждого предыдущего временного слоя пересчитываются для новых значений $t_j, v_j(\alpha_{uj}), \varphi_j, k_{AJ}$.

3. Анализ результатов моделирования нестационарных полей концентраций

Разработанная модель использовалась для моделирования полей концентраций при нестабильных входных переменных. Так, на рис. 3 показано изменение со временем t_j поля концентраций при отключении источника в момент времени t_0 ($u = 4$ м/с, $\varphi = 330^\circ$, $k_A = F$). На рис. 4 приведены в различные моменты времени изоплеты концентраций шлейфа газа или пара для непрерывно функционирующего источника при нестабильных метеорологических условиях. Данные для расчета приведены в табл. 2 (каждый столбец таблицы представляет собой набор данных на интервале времени, в течение которого атмосферные условия полагались стабильными). В принятой координатной системе северное направление ветра (n) соответствует $\varphi = 0^\circ$, северо-западное (nw) – $\varphi = 315^\circ$.

Таблица 2

Значения метеорологических параметров в интервалы времени t_j

J	0	1	2	3	4	5	6
t_j , ч	[0, 1]	[1, 3]	[3, 6]	[6, 8]	[8, 9]	[9, 10]	[10, 11]
Δt_j , ч	1	2	3	2	1	1	1
u_j , м/с	4	4	3	5	4	6	6
φ_j , °	315	315	315	315	0	0	315
k_{AJ}	C	D	D	D	B	C	D
T_{AJ} , °C	-3	-4	-4	-3	-2	0	1
J	7	8	9	10	11		
t_j , ч	[11, 12]	[12, 14]	[14, 16]	[16, 21]	[21, 24]		
Δt_j , ч	1	2	2	5	3		
u_j , м/с	9	7	10	9	8		
φ_j , °	315	315	315	0	315		
k_{AJ}	D	D	D	D	D		
T_{AJ} , °C	2	3	1	-2	-4		

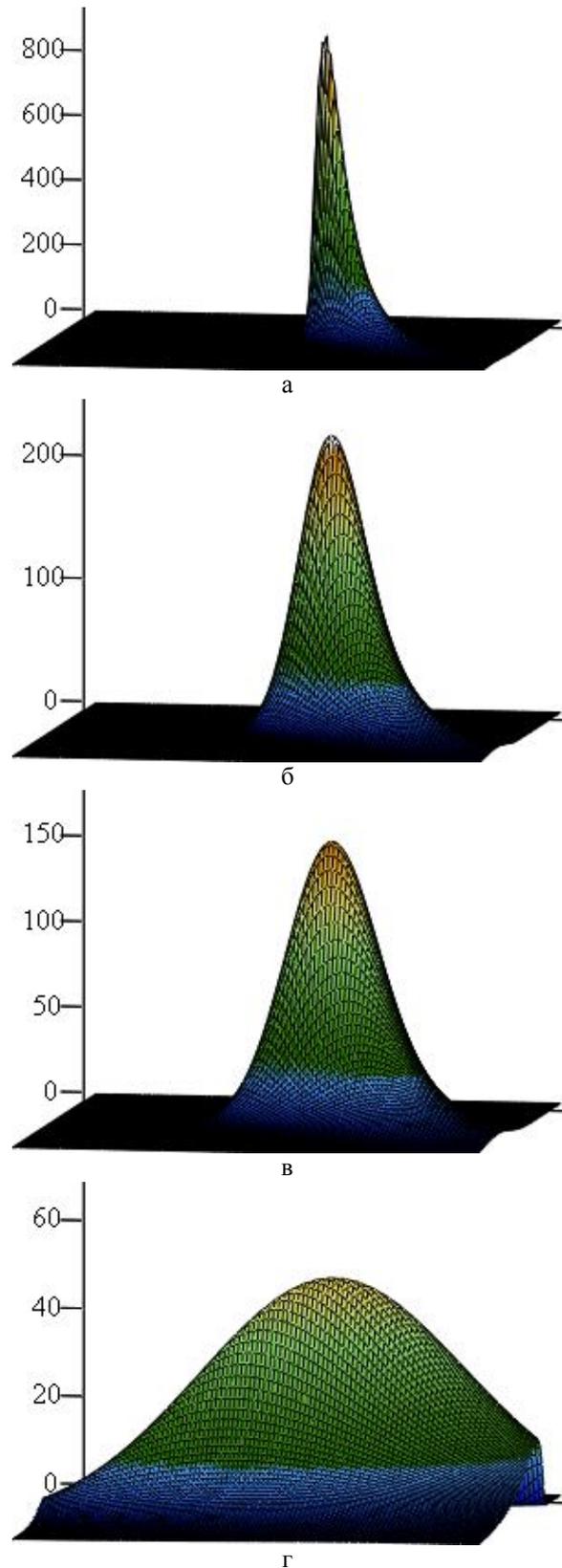


Рис. 3. Поля концентраций в различные моменты времени при отключенном источнике для стабильных атмосферных условий $u = 4$ м/с, $\varphi = 330^\circ$, $k_A = F$ (до $t = 0$ ч источник функционировал): а – $t = 0$ ч; б – $t = 1$ ч; в – $t = 2$ ч; г – $t = 3$ ч

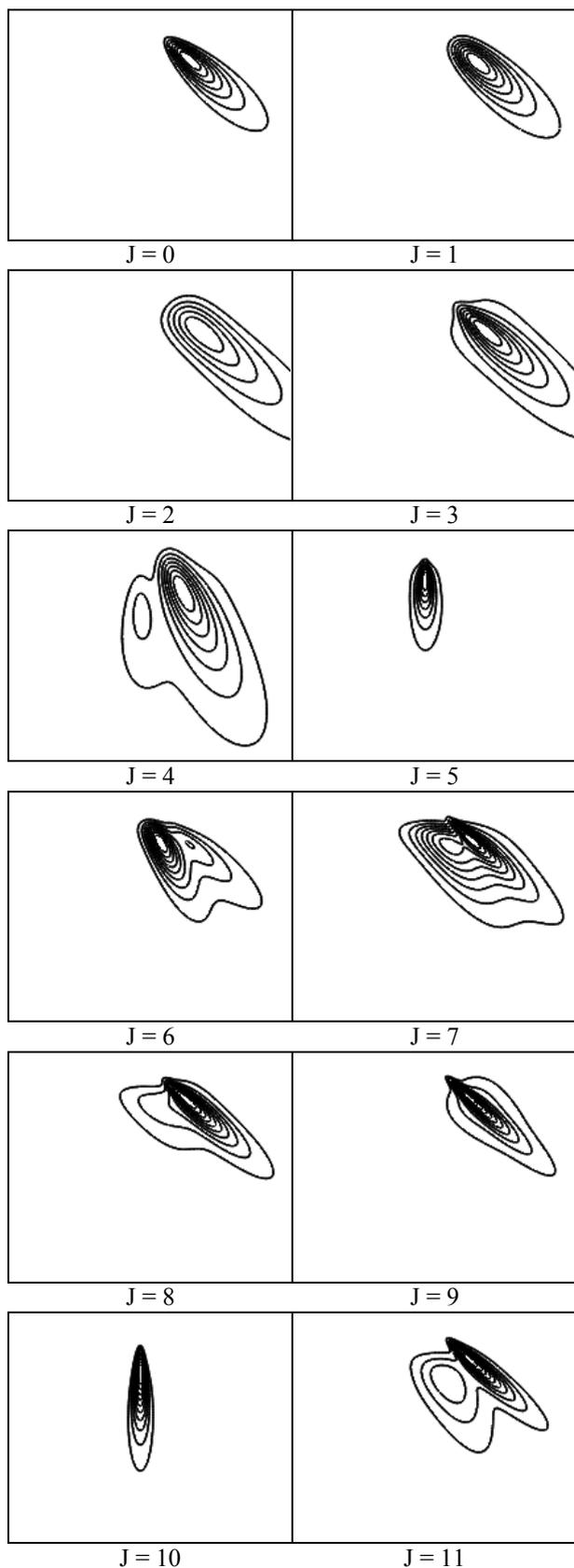


Рис. 4. Изоплеты концентраций, построенные для интервалов времени t_j (см. табл. 2) (непрерывно функционирующий источник при нестабильных атмосферных условиях)

Как видно по результатам моделирования, изолинии равных концентраций при увеличении скорости ветра и приобретают более вытянутую форму по направлению ветра φ ; в период рассеивания поллютанта (при отключении источника) размеры зон загрязнения увеличиваются с одновременным снижением значений концентраций. Для более стабильных атмосферных условий, характеризующихся отсутствием значительных перемещений и перемешивания воздушных слоев, площадь области загрязнения больше т. к. при этом поллютант переносится, преимущественно, в горизонтальном направлении.

Результирующее поле концентраций имеет сложную структуру, отражающую процессы переноса ЗВ в поле ветра и турбулентного рассеяния при непрерывном и периодически функционирующем точечном источнике загрязнения.

Заключение

При проведении экологической оценки риска необходимо учитывать неопределенность, недостаточность или недостоверность данных наблюдений, необходимых для анализа ситуации и принятия решений. В связи с этим особое значение в структуре геоинформационных систем экологического мониторинга имеет блок моделирования распределения полей концентрации загрязняющих веществ на основе общих показателей работы промышленных объектов или других источников загрязнения и степени их воздействия на окружающую среду. Такие расчеты необходимы при анализе неблагоприятной экологической ситуации в регионе для выявления ее виновников или при прогнозировании экологической обстановки при вводе в действие или реконструкции источников антропогенного воздействия на окружающую среду и определении размера затрат на уменьшение количества вредных выбросов. Разработанная модель позволяет оценить распределение концентрации поллютантов с учетом нестабильности факторов, влияющих на процессы рассеяния ЗВ в атмосфере, в т. ч. для прогнозирования последствий аварийного загрязнения атмосферы.

Литература

1. Павлій, В. А. Направления развития информационных систем мониторинга атмосферного воздуха [Текст] / В. А. Павлій, А. А. Бабакина // *Наук. праці ДонНТУ. Сер. Системний аналіз та інформаційні технології у науках про природу та суспільство*. – 2012. – Вип. 2(134) – С. 71 – 81.
2. *Руководство по контролю загрязнения атмосферы* [Текст] : РД 52.04.186-89. – М.: Госкомгидромет СССР. – 693 с.

3. A Synthetic Method for Atmospheric Diffusion Simulation and Environmental Impact Assessment of Accidental Pollution in the Chemical Industry in a WEBGIS Context [Text] / Haochen Ni, Yikang Rui, Jiechen Wang, Liang Cheng // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2014. – Iss. 11(9). – P. 9238 – 9255.

4. Pragmatic estimation of a spatio-temporal air quality model with irregular monitoring data [Text] / P. D. Sampson, A. A. Szpiro, L. Sheppard et al. // *J. Atmos. Environ.* – 2011. – Vol. 45. – P. 6593 – 6606.

5. Лисанов, М. В. Моделирование рассеяния выбросов опасных веществ в атмосфере [Текст] / М. В. Лисанов, А. В. Пчельников, С. И. Сумской // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева)*, 2005. – Т. XLIX, № 4. – С. 18 – 28.

6. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование аварийного загрязнения атмосферы в масштабе «COUNTY» [Текст] / Н. Н. Беляев, В. И. Ночвай, А. В. Берлов // *Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. Механіка*. – 2015. – Т. 23, № 5. – Вип. 19. – С. 36 – 42.

7. Васильева, И. К. Структура системы экологического мониторинга на основе вероятностной модели локального загрязнения атмосферы [Текст] / И. К. Васильева, А. С. Нечаусов // *Системы обработки информации*. – 2016. – Вип. 1 (138). – С. 176 – 182.

8. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук. – М. : Наука, 1982. – 320 с.

9. Берлянд, М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы [Текст] / М. Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеоиздат, 1975. – 448 с.

10. Геометрический анализ поля концентраций поллютантов от периодического источника в атмосфере [Текст] / А. А. Гриценко, А. Е. Равер, В. Г. Горский, Т. Н. Швецова-Шиловская // *Математические методы в технике и технологиях : сб. науч. тр. XV Междунар. науч. конф. 4 – 6 июня 2002 г.* – Тамбов, 2002. – Т. 4. – С. 58 – 60.

References

1. Pavlij, V.A., Babakina, A.A. Napravlenija razvitija informacionnyh sistem monitoringa atmosfernogo vozduha [Advancement directions of information systems for atmospheric air monitoring]. *Nauk. pratsi DonNTU. Ser. "Systemnyy analiz ta informatsiyni tekhnolohiyi u naukakh pro pryrodu ta suspil'stvo"* [Proc. of the DonNTU. Ser. "System Analysis and Information Technology in the Sciences of Nature and Society"], 2012, vol. 2(134), pp. 71-81.

2. RD 52.04.186-89. Rukovodstvo po kontrolju zagrjaznenija atmosfery [GD 52.04.186-89. Air

pollution control guide]. Moscow, Goskomgidromet SSSR Publ., 1989. 693 p.

3. Haochen Ni, Yikang Rui, Jiechen Wang, Liang Cheng. A synthetic method for atmospheric diffusion simulation and environmental impact assessment of accidental pollution in the chemical industry in a WEBGIS context. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, iss. 11(9), pp. 9238-9255. doi:10.3390/ijerph110909238.

4. Sampson, P.D., Szpiro, A.A., Sheppard, L., Lindström, J., Kaufman, J.D. Pragmatic estimation of a spatio-temporal air quality model with irregular monitoring data. *Journal of Atmospheric Environment*, 2011, vol. 45, pp. 6593-6606. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.04.073.

5. Lisanov, M.V., Pchel'nikov, A.V., Sumskoj, S.I. Modelirovanie rassejaniya vybrosov opasnyh veshhestv v atmosfere [Simulation of hazardous substances dispersion into the atmosphere]. *Ros. him. zh. (Zh. Ros. him. ob-va im. D. I. Mendeleeva)* [Russian Chemical Journal (Journal of the Russian Chemical Society named by D.I. Mendeleev)], 2005, vol. XLIX, no. 4, pp. 18-28.

6. Beljaev, N.N., Nochvaj, V.I., Berlov, A.V. Matematicheskoe modelirovanie avarijnogo zagrjaznenija atmosfery v masshtabe «COUNTY» [Mathematical modeling of accidental atmospheric pollution in the «COUNTY» scale]. *Visnyk Dnipropetrovs'koho universytetu. Ser. Mekhanika*, vol. 23, no. 5, iss. 19, pp. 36-42.

7. Vasil'eva, I.K., Nechausov, A.S. Struktura sistemy jekologicheskogo monitoringa na osnove verojatnostnoj modeli lokal'nogo zagrjaznenija atmosfery [The structure of environmental monitoring system based on atmosphere local pollution probabilistic model]. *Systemy obrobky informatsiyi*, 2016, vol. 1 (138), pp. 176-182.

8. Marchuk, G.I. Matematicheskoe modelirovanie v probleme okružhajushhej sredy [Mathematical modeling in environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.

9. Berljand, M.E. *Sovremennye problemy atmosfernoj diffuzii i zagrjaznenija atmosfery* [Modern problems of atmospheric diffusion and atmospheric pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 448 p.

10. Gricenko, A.A., Raver, A.E., Gorskij, V.G., Shvecova-Shilovskaja, T.N. Geometricheskij analiz polja koncentracij polljutantov ot periodicheskogo istochnika v atmosfere [Geometric analysis of the concentrations field of pollutants from a periodic source into the atmosphere]. *Trudy XV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah"* [Proc. XV Int. Conf. "Mathematical methods in engineering and technologies"]. Tambov, 2002, vol. 4, pp. 58-60. (In Russian).

МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПОЛІВ КОНЦЕНТРАЦІЙ АТМОСФЕРНИХ ДОМШОК

I. K. Vasilyeva, A. S. Nechausov

Розглянуто методи обчислення концентрацій забруднюючих речовин у атмосфері. Запропоновано імовірнісну модель на ґрунті нормального розподілу та S_L -розподілу Джонсона, яка дозволяє враховувати нестационарний характер факторів, що формують поля концентрацій. Розроблена модель враховує просторову локалізацію джерел забруднень, атрибути джерел, що характеризують фізичні умови потрапляння забруднюючих речовин у атмосферу, швидкість і напрямок вітру, атмосферну дифузію та час емісії. Представлено результати моделювання полів концентрацій атмосферних домішок для безперервно та періодично функціонуючого джерела забруднення за нестабільних метеорологічних умов.

Ключові слова: забруднення атмосфери, імовірнісна модель, нестационарний процес, турбулентна дифузія, час транспорту, поле концентрацій.

THE METHOD SIMULATING NON-STATIONARY FIELDS OF ATMOSPHERIC POLLUTANT CONCENTRATIONS

I. K. Vasilyeva, A. S. Nechausov

The calculational techniques of the pollutants concentration in the atmosphere have been considered. The probabilistic model based on the normal distribution as well as the S_L -Johnson's distribution has been proposed, which allows to consider non-steady nature of the factors which are shaping concentrations field. The developed model takes into account the spatial localization of the pollutant sources, the sources' attributes that characterize the physical conditions of pollutants emission into the atmosphere, wind speed and direction, atmospheric diffusion and duration of the emission. The results of the simulation of atmospheric pollutants concentration fields for steadily and intermittently functioning point source of contamination in unstable weather conditions have been presented.

Key words: atmospheric contamination, the probabilistic model, an unsteady process, turbulent diffusion, the transport time, the concentration field.

Васильєва Ирина Карловна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Производства радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: i.vasilyeva@mail.ru.

Нечаусов Артём Сергеевич – аспирант, ассистент кафедры Производства радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: nechausov@yandex.ru.

Vasilyeva Irina Karlovna – Candidate of Technical Science, Associate Professor of Department of Electronic Aircraft System Production, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: i.vasilyeva@mail.ru.

Nechausov Artyom Sergeevich – PhD Student, Assistant of Department of Electronic Aircraft System Production, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: nechausov@yandex.ru.