

Модель распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе с учетом данных метеорологических радиолокаторов

Шереметьев Р.В., кандидат физико-математических наук
Высокогорный научно-исследовательский испытательный центр
авиационной техники и вооружения, г. Нальчик
Рязанов В.И., научный сотрудник
Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик

Аннотация. В данной работе представлена математическая модель распространения примесей в локальной области на примере предгорной зоны Ставропольского края. В модель заложены соответствующие природно-климатические условия.

Тестовые расчеты показали высокую точность расчетных схем, используемых в модели. Для получения прогностических полей метеорологических параметров применяется региональная атмосферная модель. Реальные параметры облаков и воздушных потоков в локальной области контролируются доплеровским метеорологическим радиолокатором ДМРЛ-С.

Ключевые слова: распространение примесей, математическая трехмерная модель, аэрологическое зондирование, испытание ракетных двигателей, метеорологические параметры.

Введение. Вопросы математического моделирования распространения загрязняющих веществ в атмосфере достаточно подробно рассмотрены в работах [1-14]. Вместе с тем, эта проблема требует дальнейшего развития, в частности, для регионов с широким спектром местных условий, для специфических источников примесей. Построение математических моделей распространения атмосферных примесей позволяет исследователям решать широкий спектр задач, в том числе, изучать региональные и локальные особенности загрязнения окружающей среды. Существует проблема построения адекватных математических моделей, позволяющих достаточно корректно описывать распространение примесей [1,7]. Большую сложность представляет создание региональных моделей. Тем не менее, необходимость подобных моделей обусловлена зачастую наличием характерных для мезорайона особенностей, которые весьма существенны для корректных оценок. Следует отметить, что по большому счету разработка таких моделей находится еще на начальном этапе развития.

Описание численной модели. Модель включает систему уравнений гидротермодинамики для описания региональных атмосферных процессов, аналогичную представленной в [1]. Для учета орографии в модели используется обобщенная система координат $(\bar{x}, \bar{y}, \sigma)$, связанная с рельефом местности

$$x \equiv \bar{x}, \quad y \equiv \bar{y}, \quad \sigma = \frac{z - \xi(x, y)}{H - \xi(x, y)} \hat{H}, \quad (1)$$

где H и \hat{H} - высота нижней и верхней границы соответственно в z - и σ -системе координат, а $\xi(x, y)$ - функция, описывающая рельеф [1].

Региональная численная модель описывает изменение со временем динамических и термодинамических характеристик атмосферы в расчетной области.

Перенос многокомпонентных газовых примесей рассчитывается с учетом процессов фотохимической трансформации и микрофизических процессов нуклеации, конденсации и коагуляции.

Основные уравнения для скорости изменения концентрации многокомпонентных газовых примесей и аэрозолей записываются в следующем виде [1]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial C_i}{\partial x_j} = F_i^{gas} - P_i^{nucl} - P_i^{cond} + P_i^{phot} + \frac{\partial}{\partial x_j} K_{ij} \frac{\partial C_i}{\partial x_j}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varphi_k}{\partial t} + (u_j - \delta_{j3} w_g) \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_j} = F_k^{aer} + P_k^{nucl} + P_k^{cond} + P_k^{phot} + \frac{\partial}{\partial x_j} K_{kj} \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_j}. \quad (3)$$

Здесь $j = \overline{1,3}$ ($u_1 = u, u_2 = v, u_3 = w$), ($x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$); $C_i, i = \overline{1, \dots, Ng}$, $\varphi_k = \overline{1, \dots, Na}$ - концентрация газовых примесей и аэрозолей; - числа газовых компонент и аэрозольных фракций, соответственно; $((u, v, w)$ - компоненты вектора скорости ветра в направлении x, y, z , соответственно; w_g - скорость гравитационного оседания; F_i^{gas} - и F_k^{aer} - источники газовых примесей и аэрозолей; $P_i^{nucl}, P_i^{cond}, P_i^{aer}$ и P_k^{phot} - нелинейные операторы нуклеации, конденсации, коагуляции и фотохимической трансформации, соответственно.

Уравнения (1)-(2) рассматриваются в области

$$D_t = D \times [0, T], \quad D = \{(x, y, z); x \in [-X, X], y \in [-Y, Y], z \in [z_0, H]\},$$

где H - верхняя граница области интегрирования. Начальные условия задаются в виде:

$$C_i(x, y, z) = C_i^0(x, y, z); \quad \varphi_k(x, y, z) = \varphi_k^0(x, y, z), \quad \text{при } t = 0. \quad (4)$$

На боковых границах области задаются следующие краевые условия:

$$\begin{aligned} \varphi_i|_{\Omega} &= \varphi_i^b, \text{ есть } u_n < 0, \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial n}|_{\Omega} &= 0, \text{ есть } u_n \geq 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где Ω - боковая поверхность, n - внешняя нормаль к Ω , u_n - нормальная компонента вектора скорости.

Уравнение турбулентной диффузии (2)(3) решается по методу покомпонентного расщепления.

Удаление микропримесей газов из воздуха осуществляется за счет различных механизмов. Они включают в себя абсорбцию и осаждение на поверхность земли, самоочищение в процессах образования облаков и туманов, вымывание осадками и т.д.

Исходной информацией для инициализации моделей является метеорологическая информация и данные о текущем состоянии природной среды.

Для расчета влажного вымывания примесей атмосферными осадками в модели предлагается использовать данные радиолокационных наблюдений. С помощью автоматизированных метеорологических локаторов МРЛ-5 в аэропортах через определенные промежутки времени строятся карты распределения облаков и осадков на большой площади. Данные об интенсивности осадков позволяют более корректно рассчитывать поток примесей на поверхность земли в результате вымывания, чем при использовании среднестатистических данных метеопостов.

Для анализа полей метеорологических параметров и загрязняющих веществ авторами разработан программный модуль трехмерного представления данных на основе современных графических программных библиотек.

Модуль предназначен для визуализации больших многомерных сеточных наборов данных, полученных в модели. Программа позволяет строить изоповерхности, плоскости линий контура, цветные плоскости, объемные представления данных в трехмерной сетке и т.д, затем вращать и анимировать изображения в режиме реального времени. Реализованы также возможности рассмотрения траектории ветра, изменение прозрачности объектов и др. Применение средств визуализации объемных данных дает возможность их интерпретации на высоком научном уровне.

Некоторые результаты расчетов на основе модели

Для проверки работоспособности модели, а также алгоритмов численной реализации, проведены тестовые расчеты, которые показали удовлетворительную точность при расчетах распространения примесей. Задача решалась в устойчиво стратифицированной атмосфере при следующих значениях параметров:

$$\begin{aligned} C_0 &= 10^3 \text{ м}^3; x_0 = 5 \text{ км}; y_0 = 5 \text{ км}; z_0 = 5 \text{ км}; V = 500 \text{ м}; K = 300 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}; \\ w &= 3 \text{ м с}^{-1}; u=v=3 \text{ м с}^{-1} \end{aligned}$$

Интегрирование системы уравнений проводилось по пространственно-временной области $D \times T : \{0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z, \tau > 0\}$. Размеры пространственной области составляли 16 км по горизонтали и по вертикали. Шаг сетки по осям x, y, z составлял 200 м, по времени - 5 с.

В данной задаче контрольной величиной является интегральное число частиц:

$$N(t) = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C(x, y, z, t) dx dy dz, \quad (6)$$

которое должно сохраняться при интегрировании системы по времени:

$$N(t) = \text{const}. \quad (7)$$

Контрольное время t_1 составляло 10 мин (600 с), время t_2 составляло 20 мин (1200 с). На рис. 1. представлены результаты тестовых расчетов - приведены изоповерхности концентрации примеси $C = 10 \text{ м}^3$ в начальный момент времени $t_0=0$ (нижняя сфера) и в момент времени $t_2=20$ мин (верхняя сфера). Интегральное число частиц соответственно равнялось $N(0) = 10832$, $N(t_1) = 10823$, $N(t_2) = 10823$. Как видно, условие (7) выполняется с высокой точностью.

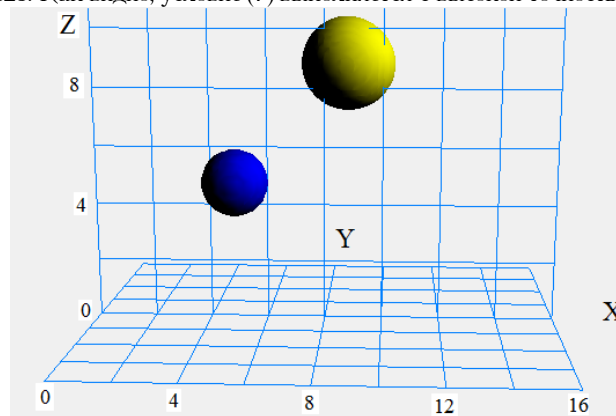


Рис. 1. Изоповерхности концентрации частиц $C = 10 \text{ м}^3$ в моменты времени $t_0=0$ (нижняя сфера) и $t_2=20$ мин (верхняя сфера)

Облако примеси переносится ветром и расширяется вследствие турбулентной диффузии, максимальная концентрация частиц со временем уменьшается. Через 5 минут она уменьшилась примерно на порядок и составила $C_{\text{max}}=132,45 \text{ м}^3$ (рис. 1).

На основе построенной модели проведены предварительные расчеты при различных метеорологических данных. Моделировался стационарный источник.

Была выбрана область, представляющая собой прямоугольный пространственный параллелепипед со сторонами $18 \times 18 \times 12 \text{ км}$ со сложными метеорологическими характеристиками. Ось Y направлена на север, ось X — на восток. Область включает район со сложной орографией и воздушными потоками. Сложности вызваны необходимостью построения поля ветра в выбранном домене и расчет коэффициентов турбулентной диффузии [7,8].

В начальный момент концентрация примеси нулевая, кроме точки (10, 120, 0.2)

Подстилающая поверхность в начальный момент времени чиста. Значения некоторых физических параметров, используемых при расчетах такие:

$$k_x = k_y = k_z = 15 \text{ м}^2\text{с}^{-1}; v_x = 8 \text{ мс}^{-1}; v_y = -8 \text{ мс}^{-1}; v_z = 0.$$

Источник примеси расположен в точке (10, 120, 0.2), его мощность $100 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$.

Результаты моделирования, получаемые с помощью предложенной математической модели, позволяют получать информацию о распределении примеси в приземном слое атмосферы от различных источников загрязнения с учетом динамических и гидротермодинамических параметров атмосферы.

Использование данных автоматизированных МРЛ качественно улучшает анализ экологической обстановки в исследуемом регионе. При необходимости могут быть задействованы данные региональной радарной метеорологической сети.

Автоматизированные МРЛ обеспечивают [13-14]

- получение радиолокационной информации в полусфере обзора за время 3-7 мин;
- фильтрацию отражений от местных предметов;
- отображение общей информации о наличии, интенсивности, направлении и скорости смещения и тенденции развития облачности на расстоянии до 250 км;
- расчет карт явлений погоды (град, гроза, ливневый дождь, снегопад, шквал), интенсивности и количества осадков;
- архивацию и отображение накопленной информации;
- передачу данных по каналам связи для заинтересованных потребителей.

Карты накопленных осадков за период времени позволяют рассчитать поток примесей на подстилающую поверхность за счет вымывания.

В облаках происходят сложные взаимодействия различных физических процессов, роль которых велика и пренебрегать которыми нельзя. То же самое можно сказать и о физике распространения газовых примесей и аэрозолей. Очевидно, растворяясь в облачных каплях, примеси начинают влиять на дальнейшее развитие микрофизических процессов. Эти вопросы требуют отдельного рассмотрения.

Литература:

1. Алоян А.Е., Пененко В.В., Козодеров В.В. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды//в кн. Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования, т.2, Математическое моделирование. - М.: Наука, 2005. - С. 279-351.
2. Амвросов А.Ф. Особенности распространения и рассеяния примеси над горным районом.-Труды ИЭМ, 1990, вып. 51 (142)- с 45-52.
3. Аршинова В.И. и др. Некоторые данные о загрязнении воздуха в Москве и его связи с метеорологическими условиями. Труды ЦВГМО, вып. 2, 1972.-с. 110-117.
4. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. Под редакцией Ф. Т. М. Ньюстада и Х. Ван Допа.- Л.: Гидрометеиздат, 1985.-351 с.
5. Белов И.В., Беспалов М.С., Клочкова Л.В., Кулешов А.А., Сузан Д.В., Тишкин В.Ф. Транспортная модель распространения газообразных примесей в атмосфере города // Математическое моделирование, 2000, т.12, №11.- С.38-46.
6. Безутлая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. -Л.: Гидрометеиздат, 1980.-184 с.
7. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы.-Л.: Гидрометеиздат, 1985.-265 с.
8. Бызова Н.Л. Рассеяние примеси в пограничном слое атмосферы. -М.: Гидрометеиздат,1974.-191 с.
9. Владимиров А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Т. Охрана окружающей среды.-Л.: Гидрометеиздат, 1981.-480 с.
10. Воробьев К.В., Постнова И.С., Широкова Л., Яковченко Г., Разработка информационно-моделирующей системы для оценки загрязненности атмосферы территорий Алтайского края. Вычислительные технологии. -2000.- Т.5.-С.117-127.
11. Дымников В.П., Алоян А.Е. Монотонные схемы решений уравнений переноса в задачах прогноза погоды, экологии и теории климата//ИАН. Физика атмосферы и океана, 1990, т.26, №12.- С. 1237-1247.
12. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды.- М.: Гидрометеиздат, 1984.-560 с.
13. Шаповалов А.В., Рязанов В.И., Гучаева З.Х., Увижева Ф.Х., Шаповалов В.А. Численное моделирование распространения примесей с учетом метеопараметров и данных ДМРЛ// Сборник научных трудов: Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 2017. С. 101-108.
14. Шаповалов А.В., Шаповалов В.А., Рязанов В.И. Математическая модель распространения примесей в ближней зоне при работе ракетных двигателей//Наука. Инновации. Технологии. 2017. № 2. С. 87-96.