

Васильев А.Н., Ложкин В.Н., Ложкина О.В., Тархов Д.А., Тимофеев В.Д. Нейросетевые модели загрязнения торфяным пожаром воздуха в районе автомагистрали. // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: Сб. статей XVI Междунар. научно-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, 2016. – С. 109-116.

УДК 004.032.26+519.63:517.951

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТОРФЯНЫМ ПОЖАРОМ ВОЗДУХА В РАЙОНЕ АВТОМАГИСТРАЛИ*

А.Н. Васильев, В.Н. Ложкин, О.В. Ложкина, Д.А. Тархов, В.Д. Тимофеев

NEURAL NETWORK MODELS OF HIGHWAY AREA AIR POLLUTION BY PEAT FIRE

A.N. Vasilyev, V.N. Lozhkin, O.V. Lozhkina, D.A. Tarkhov, V.D. Timofeev

Аннотация. Диффузия угарного газа от торфяного пожара в окрестности автомагистрали представлена оригинальными нейросетевыми моделями с гетерогенными дифференциальными данными. Разработаны методы уточнения модели по данным расчета и измерения концентраций оксида углерода в области распространения дымового облака. Численные решения задачи приводятся в форме нейросетевых аппроксимаций полей концентраций для модели Гаусса и приближённых нейросетевых решений дифференциальных уравнений с частными производными для диффузии легкой фракции. Обученная нейронная сеть может быть применена для прогноза возникновения чрезвычайной ситуации при изменении скорости и направления ветра и параметров пожара. Метод рекомендуется использовать в информационных процессах мониторинга качества воздушной среды.

Ключевые слова: автомагистраль; торфяной пожар; угарный газ; опасное загрязнение воздуха; транспортный коллапс; информационный процесс; нейросетевая модель.

Abstract. The diffusion of carbon monoxide from a peat fire in the vicinity of the motorway is presented by the original neural network models with heterogeneous differential data. The methods of model refinement according to the calculation and measurement of carbon monoxide concentration in the smoke cloud area are elaborated. The numerical solutions of the problem are presented in the form of neural network approximations of concentration fields for Gauss model and neural network approximate solutions of partial differential equations for light fraction diffusion. The trained neural network can be used for prediction of an emergency when changing wind speed and direction and fire parameters. The method is recommended to use in the information processes monitoring the air environment quality.

Keywords: highway; peat fire; carbon monoxide; hazardous air pollution; traffic jams; information process; neural network model.

Введение. Актуальность проблемы. При торфяных пожарах горение происходит под землей без открытого огня при недостатке кислорода с обильным выделением угарного газа (СО). Если торфяной пожар развивается в окрестности автомагистрали, то смог затрудняет дыхание, уменьшает видимость, приводит к чрезвычайной ситуации – транспортному коллапсу.

Исследована возможность нейросетевого прогнозирования такой ситуации по гетерогенной расчетно-экспериментальной информации о концентрациях СО. Задача решалась с использованием данных реального транспортного коллапса, наблюдавшегося с 26.10.15 г. по 07.01.16 г. в Иркутской области РФ при горении торфа вблизи автомагистрали «Сибирь».

* Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты №14-01-00660 и №14-01-00733).

Большой интерес представляет разработка функциональных моделей, позволяющих проводить сценарное моделирование возникновения подобных ситуаций без повторного решения дифференциальных уравнений в частных производных для разных наборов входных параметров. В качестве таких моделей использовались нейронные сети, важной особенностью которых является возможность их уточнения для пополняемых гетерогенных данных: результатов наблюдений и численных расчётов при частных значениях параметров задачи – скорости и направления ветра, области пожара, интенсивности выделения СО и т.д.

Общая постановка. Нейросетевые модели. Согласно [1] для торфяного пожара в окрестности автомагистрали следует учитывать мгновенные значения концентрации и скорости диффузии СО, а также пульсационные отклонения этих значений. Задача упрощается [2] с переходом к модели турбулентной диффузии для средних значений концентраций по уравнению:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} + \alpha q = Q, \quad (1)$$

где x и y – координаты в горизонтальной плоскости; z – координата по вертикали; t – время; u , v , w – компоненты средней скорости перемещения СО соответственно по направлениям осей координат x , y , z , k_x , k_y , k_z – составляющие коэффициента обмена; α – коэффициент, учитывающий вероятный метаболизм СО в атмосфере.

Для решения указанных проблем предлагается применить методы нейросетевого моделирования [3-9]. Постановка задачи определяется качеством уточняемой информации об объекте моделирования в процессе нейросетевых обучающих итераций.

Первый пример постановки и реализации решения задачи моделирования.

При моделировании переноса облака смога торфяного пожара на значительные расстояния теряет значимость турбулентная диффузия. Применим оригинальный нейросетевой подход моделирования переноса СО на основе модели Гаусса: будем предполагать, что в мигрирующем в окрестности автомагистрали облаке смога от торфяного пожара изменение концентрации СО подчиняется нормальному закону распределения.

Используя принцип суперпозиции, легко получить формулу для расчета концентрации СО от торфяного пожара непрерывного действия в виде интеграла по области Ω , занятой торфяным пожаром. Аналитические методы приведут к громоздким формулам, а численные методы потребуют большого времени счета. Для решения проблемы используем кубатурные формулы и заменяем интеграл конечной суммой:

$$q(t, x, y, z; u, v, w) = \sum_{i=1}^N C_i \frac{Q \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-ut-x_i)^2}{(\sigma_x)^2 t} + \frac{(y-vt-y_i)^2}{(\sigma_y)^2 t} + \frac{(z-wt-z_i)^2}{(\sigma_z)^2 t} \right) \right)}{(\sqrt{2\pi t})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z}, \quad (2)$$

где C_i – числовые коэффициенты, (x_i, y_i, z_i) – узлы интегрирования, $i=1, 2, \dots, N$.

Приближение (2) для концентрации q угарного газа (СО) можно рассматривать как модель, которая соответствует искусственным нейронным сетям с радиальными базисными функциями в случае использования в качестве базисной функции гауссиана [3]. Настройка весов сети – линейно и нелинейно входящих параметров C_i и (x_i, y_i, z_i) – осуществляется на основе минимизации функционала ошибки, взятого, например, в дискретной форме

$$J = \sum_{j=1}^p |q(t, \bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j; u, v, w) - q_j(t; u, v, w)|^2, \quad (3)$$

здесь $\{(\bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j)\}_{j=1}^p$ – множество точек в области $\tilde{\Omega}$, где известны измеренные значения концентрации $\{q_j\}_{j=1}^p$ угарного газа. Возможна и модификация подхода с построением параметрических нейросетевых моделей, в которых скорость ветра вводится в число входных параметров.

Второй пример постановки и реализации решения задачи моделирования.

Для решения конкретной задачи торфяного пожара уравнение (1) можно существенно упростить. При изменении параметров задачи – скорости ветра, радиуса пожара и т.д. – процесс будем считать квазистационарным, т.е. установление концентраций происходит намного быстрее изменения указанных параметров. Таким образом, мы принимаем $\partial q / \partial t = 0$.

Предполагаем также, что средний турбулентный поток опасных веществ у земной поверхности мал. Для лёгких фракций, не имеющих собственной скорости осаждения, можем принять $w = 0$. Будем считать коэффициенты обмена постоянными. Выбором координатной системы и масштабированием получаем для концентрации легкой фракции (СО) уравнение

$$u \frac{\partial q}{\partial x} - \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) = Q, \quad (x, y) \in \tilde{\Omega}, \quad (4)$$

где Q – константа в месте торфяного пожара – круге $\Omega \subset \tilde{\Omega}$, вне пожара – $Q = 0$, $\tilde{\Omega} \setminus \Omega$. В качестве граничных условий используем стремление концентрации к нулю на бесконечности. Остаются параметры – радиус области пожара и компонента скорости ветра u . При этом варианте постановки они фиксированы и задаются вначале с остальными данными. Их можно менять, повторно проводя обучение модели.

Решение (4) ищем в виде нейросетевой модели

$$q(x, y) = \sum_{i=1}^N c_i \exp \left\{ \left[-a_i (x - x_i)^2 - b_i (y - y_i)^2 \right] \right\}, \quad (5)$$

параметры которой $-a_i, b_i, c_i, x_i$ и y_i – находятся с помощью минимизации функционала ошибки

$$J_1 = \sum_{j=1}^M \left| u \frac{\partial q(\xi_j, \eta_j)}{\partial x} - \frac{\partial^2 q(\xi_j, \eta_j)}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 q(\xi_j, \eta_j)}{\partial y^2} - Q(\xi_j, \eta_j) \right|^2, \quad (6)$$

где $\{(\xi_j, \eta_j)\}_{j=1}^M$ – множество пробных точек в области $\tilde{\Omega}$, в которой строится решение; это множество регенерируется через 3-5 шагов минимизации J_1 ; $Q(\xi_j, \eta_j) = 1$ в области пожара Ω и $Q(\xi_j, \eta_j) = 0$ в остальных точках $\tilde{\Omega} \setminus \Omega$.

Приведём результаты вычислений для значений $N=20, M=200$, область пожара предполагается кругом Ω радиуса 1, $u=1$ (рис. 1).

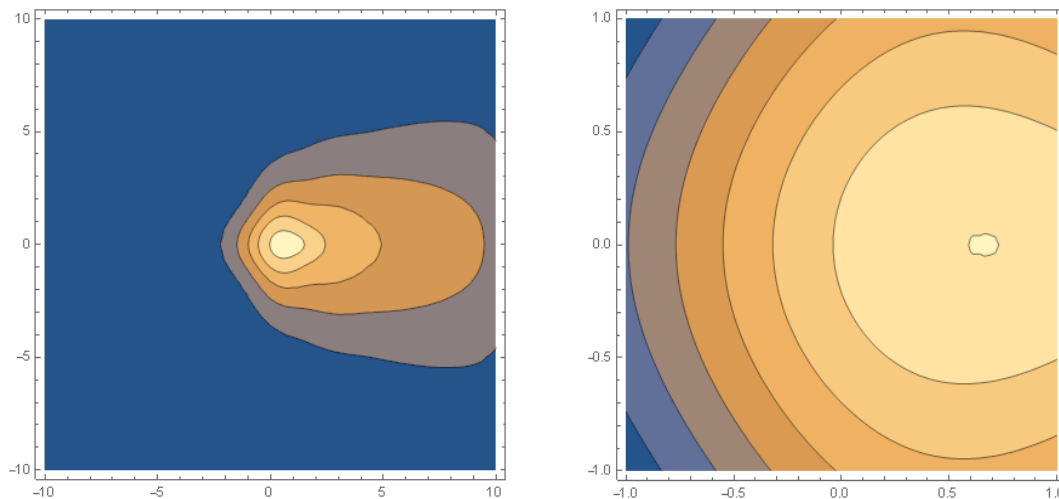


Рис. 1. Линии уровня выхода нейросетевой модели $q(x, y)$ во всей области изменения переменных, в которой ищется решение (слева) и в окрестности пожара (справа)

Для целей сценарного моделирования были построены параметрические модели, в которых скорость ветра u входила в число входных параметров. При этом приближённое решение искалось в виде гетерогенной нейросетевой функции

$$q(x, y, u) = \sum_{i=1}^N c_i \exp\left\{\left[-a_i(x - x_i)^2 - b_i(y - y_i)^2\right]\right\} \text{th}[d_i(u - u_i)], \quad (7)$$

параметры которой $-a_i, b_i, c_i, d_i, x_i, y_i$ и u_i — находятся с помощью минимизации функционала ошибки

$$J_2 = \sum_{j=1}^M \left| \mu_j \frac{\partial q(\xi_j, \eta_j, \mu_j)}{\partial x} - \frac{\partial^2 q(\xi_j, \eta_j, \mu_j)}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 q(\xi_j, \eta_j, \mu_j)}{\partial y^2} - Q(\xi_j, \eta_j) \right|^2, \quad (8)$$

где пробные точки $\{(\xi_j, \eta_j, \mu_j)\}_{j=1}^M$ периодически регенерируются.

Соответствующие графики похожи на графики, представленные на рис. 1. Полученная параметрическая модель позволяет прогнозировать изменение уровня загрязнений при изменении силы ветра.

Данные модели легко уточняются при наличии измерений концентрации в некотором наборе точек. При этом в функционал ошибки (6) или (8) добавляется дополнительное слагаемое, равное сумме квадратов разностей измеренных значений и выходов нейронной сети. Аналогичным образом учитываются данные численных расчётов с помощью стандартных методов или пакетов для частных наборов параметров.

Выводы. Смог (дым с угарным газом) от торфяного пожара способен приводить к чрезвычайной ситуации – транспортному коллапсу с большим экономическим ущербом. В качестве инструмента прогнозирования такой ситуации предлагается использовать математические модели, построенные на основе оригинального нейросетевого подхода. Разработаны и протестированы методы построения нейросетевой модели диффузии СО по расчетно-экспериментальным данным транспортного коллапса, наблюдавшегося с 26.10.15 г. по 07.01.16 г. в Иркутской области России при горении торфа вблизи автомагистрали федерального значения Р-255 «Сибирь». Для построения нейросетевых моделей использовались гетерогенные данные: уравнения атмосферной диффузии веществ в виде дифференциальных

уравнений в частных производных; данные расчета на основе функции Гаусса распределения концентрации СО в облаке смога торфяного пожара; данные непосредственных измерений концентрации СО на автомагистрали в зоне действия чрезвычайной ситуации государственными метеорологическими службами. Разработанные методы рекомендуется применять в системах контроля качества и прогноза состояния воздушной среды для анализа, прогноза и предотвращения подобных чрезвычайных ситуаций.

Библиографический список

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
2. Берлянд М.Е., Генихович Е.Л., Оникул Р.И. Моделирование загрязнения атмосферы выбросами из низких и холодных источников // Метеорология и гидрология. 1990. № 5. С. 5–16.
3. Васильев А.Н., Тархов Д.А. Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. 528 с.
4. Tarkhov D.A., Vasilyev A.N. New neural network technique to the numerical solution of mathematical physics problems. I: Simple problems // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2005. V. 14. Pp. 59–72.
5. Tarkhov D.A., Vasilyev A.N. New neural network technique to the numerical solution of mathematical physics problems. II: Complicated and nonstandard problems // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2005. V. 14. Pp. 97–122.
6. Vasilyev A.N., Tarkhov D.A. Mathematical Models of Complex Systems on the Basis of Artificial Neural Networks. Nonlinear Phenomena in Complex Systems, vol.17 (2014), 3, pp. 327–335.
7. Kainov N.U., Tarkhov D.A., Shemyakina T.A. Application of neural network modeling to identification and prediction in ecology data analysis for metallurgy and welding industry. Nonlinear Phenomena in Complex Systems, vol. 17 (2014), 1, pp. 57–63.
8. Gorbachenko V.I., Lazovskaya T.V., Tarkhov D.A., Vasilyev A.N., Zhukov M.V. Neural Network Technique in Some Inverse Problems of Mathematical Physics // Springer International Publishing Switzerland 2016 L. Cheng et al. (Eds.): ISSN 2016, LNCS 9719, pp. 310–316, 2016.
9. Shemyakina T.A., Tarkhov D.A., Vasilyev A.N. Neural Network Technique for Processes Modeling in Porous Catalyst and Chemical Reactor // Springer International Publishing Switzerland 2016 L. Cheng et al. (Eds.): ISSN 2016, LNCS 9719, pp. 547–554, 2016.

Васильев Александр Николаевич
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: a.n.vasilyev@gmail.com

Vasilyev A.N.
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

Тархов Дмитрий Альбертович
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: dtarkhov@gmail.com

Ложкин Владимир Николаевич
Санкт-Петербургский университет
государственной противопожарной
службы МЧС России,
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vnlojkin@yandex.ru

Тимофеев Владимир Дмитриевич
Санкт-Петербургский университет
государственной противопожарной
службы МЧС России,
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: timofeev-v-d@yandex.ru

Ложкина Ольга Владимировна
Санкт-Петербургский университет
государственной противопожарной
службы МЧС России,
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: olojkina@yandex.ru

Tarkhov D.A.
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

Lozhkin V.N.
St. Petersburg University
of State Fire Service
of EMERCOM of Russia,
St. Petersburg, Russia

Timofeev V.D.
St. Petersburg University
of State Fire Service
of EMERCOM of Russia,
St. Petersburg, Russia

Lozhkina O.V.
St. Petersburg University
of State Fire Service
of EMERCOM of Russia,
St. Petersburg, Russia