



УДК 004:574

С.Ж. Рахметуллина, Е.М. Турганбаев, О.А. Передерий
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ
С УЧЕТОМ ФОТОХИМИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ**

Одна из важнейших проблем современности – охрана окружающей среды от отрицательного воздействия антропогенных источников. От правильного и своевременного решения данного вопроса зависят здоровье и благосостояние людей. Город Усть-Каменогорск представляет собой уникальную урбанизированную систему, перенасыщенную промышленными предприятиями различной техногенной ориентации. Ощутимый вклад в загрязнение окружающей среды вносят транспорт, предприятия химической, энергетической промышленности, предприятия цветной металлургии.

Разработка аналитической поддержки системы мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в промышленно развитых городах является одним из актуальных направлений развития информационных технологий экологического мониторинга и их инструментальных средств.

В работах [1], [2] рассмотрены этапы разработки информационно-аналитической системы мониторинга загрязнения атмосферного воздуха. Рассматривается модель переноса соединений серы, азота на основе решения уравнения турбулентной диффузии, так как эти химические соединения доминируют в атмосфере промышленного города.

В данной статье, рассматривается система автоматизации процесса расчета концентрации и прогноза состояния загрязнения атмосферного воздуха с учетом фотохимических трансформаций для соединений четырех газовых компонент: диоксида серы (SO_2), диоксида азота (NO_2), оксида азота (NO) и оксида углерода (CO). Математическое обеспечение системы включает: модель прогноза загрязнения атмосферного воздуха с учетом фотохимических трансформаций, базу нечетких продукционных правил для определения категории штормового предупреждения о неблагоприятных метеорологических условиях (НМУ), средства ГИС-технологий для визуализации результатов моделирования.

Система состоит из четырех подсистем:

- подсистема организации сбора и хранения данных, занимающаяся соответственно сбором, хранением данных в специальной базе данных (БД);
- подсистема прогноза загрязнения с учетом фотохимических трансформаций;
- подсистема оценки НМУ;
- подсистема формирования выходных документов, организующая формирование выходных документов с помощью приложения Microsoft Excel.

Структурно-функциональная модель системы представлена на рис. 1.

Информационное обеспечение системы содержит структурированные в виде реляционной БД экологические, метеорологические, географические данные, данные об источниках загрязняющих веществ и их концентраций в ПНЗ, собранные и сохраненные в определенный период времени.



Рисунок 1 - Структурно-функциональная модель

Один из существующих подходов при моделировании распространения загрязняющих веществ заключается в том, что рассматривается уравнение переноса примеси [3], [4]. Компоненты скорости ветра, участвующие в уравнении переноса примеси, являются входными параметрами и определяются как постоянные величины. Рассматривается пограничный слой атмосферы высотой H , нижняя часть атмосферы представляет собой квазистационарный приземный слой высотой $h = h(x, y)$.

В прямоугольной области рассматривается следующая модель:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div} \vec{u}c + Bc = F + \Delta c, \quad (1)$$

где c – концентрация загрязняющего вещества;

t – время;

B – оператор трансформации;

F – функция, описывающая источники примесей;

Δ – оператор, определяющийся по формуле

$$\Delta = \frac{\partial}{\partial x} \mu_1 \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_2 \frac{\partial}{\partial y}, \quad (2)$$

в котором μ_1, μ_2 – горизонтальные коэффициенты турбулентности,

а $\text{div} \vec{u}c$ определяется следующим равенством:

$$\text{div} \vec{u}c = u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y}, \quad (3)$$

где u, v – компоненты вектора скорости ветра в направлениях декартовых координат x и y .

Краевые условия:

$$c = c_0 \text{ при } x=0, X, y=0, Y. \quad (4)$$

Начальные условия при $t=0$ задаются по данным измерений и относятся к числу пара-

метров настройки рассматриваемой модели.

В данной работе рассмотрена модель переноса для соединений четырех газовых компонент: диоксида серы (SO_2), диоксида азота (NO_2), оксида азота (NO) и оксида углерода (CO), на основе решения уравнения турбулентной диффузии, так как эти химические соединения присутствуют в атмосфере промышленного города.

Для реализации модели выбран метод расщепления. Идея метода заключается в том, что уравнение или система уравнений расщепляется на несколько более простых, решаемых последовательно на дробных шагах, в сумме составляющих один шаг по времени. Метод расщепления дает возможность для каждого уровня уравнения построить такие конечно-разностные схемы, которые учитывают пространственные и временные масштабы процессов, описываемых этими уравнениями. Схема аппроксимации модели по времени, исходя из принципов расщепления «по физическим процессам», на каждом временном шаге делится на следующие основные этапы: перенос субстанций вдоль траектории и турбулентный обмен; процесс фотохимических трансформаций.

Перенос субстанции вдоль траектории и турбулентный обмен:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div} \vec{u}c = F. \quad (5)$$

Краевые условия:

$$c = c_0 \text{ при } x=0, x=X; \quad (6)$$

$$c = c_0 \text{ при } y=0, y=Y. \quad (7)$$

Решение уравнения переноса субстанций вдоль траекторий и турбулентного обмена служит начальным условием для задачи процесса фотохимических трансформаций.

Процесс фотохимической трансформации:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + Bc = 0. \quad (8)$$

Система уравнений решается при следующих краевых условиях:

$$c = c_0 \text{ при } x=0, x=X; \quad (9)$$

$$c = c_0 \text{ при } y=0, y=Y. \quad (10)$$

Для определения поля концентрации уточняется оператор B , который определяется кинетикой химических реакций.

Для решения первого уравнения воспользуемся методом компонентного расщепления. Эволюционная задача с помощью покомпонентного расщепления сводится к последовательному решению ряда задач, и далее каждое уравнение решается методом прогонки.

При решении задачи процесса фотохимических трансформаций уравнение (8) в дискретном виде будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{c_{i,j}^{n+1} - c_{i,j}^{n+1/2}}{\tau} + Bc_{i,j}^{n+1} = 0. \quad (11)$$

Оператор B определяется кинетикой химических реакций. При поглощении кванта света образуется электронно-возбужденная частица, отличающаяся от частицы в основном состоянии по свойствам, в том числе по способности к химическим превращениям. Химические превращения, протекающие под действием света в видимой и ультрафиоле-

товой области спектра, называются фотохимическими реакциями. При промышленных выбросах примесей происходит ряд сложных химических и фотохимических реакций, в результате которых образуются новые, еще более токсичные, вещества [4]. При численном моделировании учет фотохимических процессов заключается в расчете констант скоростей исходя из известных спектров поглощения этих веществ, интенсивности солнечного света с учетом зенитного угла падения. Для каждого промышленного района характерен определенный набор субстанций естественного и антропогенного происхождения, которые могут взаимодействовать между собой и трансформироваться.

Рассматривается следующая система уравнений относительно концентраций 22 газовых компонент [5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_1}{\partial t} = & -k_{137}^* S_1 - k_6 S_1 S_{25} - k_{77} S_1 S_{41} - k_{93} S_1 S_{63} - k_{115} S_1 S_{75} - k_{116} S_1 S_{73} - k_{134} S_1 S_{42} - \\ & - k_{135} S_1 S_{79} + k_{138} S_0 S_8 + k_{144} S_9 S_{12} + k_{145} S_9 S_{20} + k_{146} S_9 S_{10} - k_{147} S_1 S_8 - k_{148} S_1 S_{12} - \\ & - k_{149} S_1 S_2 - k_{150} S_1 S_4 - k_{151} S_1 S_{22} - k_{152} S_8 S_{23} - k_{156} S_1 S_{24}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_2}{\partial t} = & 2k_{22}^* S_{28} + k_{41}^* S_{29} + k_{43}^* S_{30} + k_{55}^* S_{36} + 2k_3^* S_7 S_{11} - k_{12} S_2 S_{25} + k_{13} S_4 S_{25} - k_{14} S_2 S_{12} - \\ & - 2k_{15} S_2 S_2 - 2k_{16} S_2 S_2 + k_{17} S_4 S_{12} - k_{18} S_2 S_4 - k_{23} S_2 S_{28} - k_{25} S_2 S_{21} + k_{26} S_4 S_{21} - k_{28} S_2 S_{20} - \\ & - k_{42} S_2 S_{29} - k_{44} S_2 S_{30} - k_{47} S_2 S_{32} + k_{48} S_{11} S_{32} - k_{57} S_2 S_{36} - k_{61} S_2 S_{34} - k_{65} S_2 S_{14} + k_{68} S_{13} S_{28} - \\ & - k_{71} S_2 S_{39} - k_{74} S_2 S_{44} - k_{82} S_2 S_{52} - k_{83} S_2 S_{54} - k_{87} S_2 S_{45} + k_{97} S_{11} S_{27} - k_{99} S_2 S_{65} - k_{101} S_2 S_{35} - \\ & - k_{104} S_2 S_{58} - k_{105} S_2 S_{58} - k_{125} S_0 S_2 S_{18} + 2k_{127} S_4 S_{27} - k_{129} S_2 S_{57} - k_{133} S_{12} S_{27} - k_{142} S_2 S_{16} - \\ & - k_{149} S_1 S_2 + k_{150} S_1 S_4 + k_{155} S_4 S_{22}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{\partial S_3}{\partial t} = k_{149}^* S_1 S_2 - k_{154} S_3 S_{10}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_4}{\partial t} = & k_{46}^* S_{16} - k_{13} S_4 S_{25} + k_{14} S_2 S_{12} - k_{17} S_4 S_{12} - k_{18} S_2 S_4 - 2k_{19} S_4 S_4 - 2k_{20} S_0 S_4 S_4 - \\ & - 2k_{21} S_4 S_4 S_7 + k_{23} S_2 S_{28} - k_{26} S_4 S_{21} - k_{30} S_4 S_{20} - k_{31} S_4 S_{20} + k_{45} S_{16} - k_{54} S_4 S_{23} + k_{58} S_{10} S_{24} + \\ & + k_{64} S_{10} S_{37} + k_{66} S_0 S_{10} S_{27} + k_{68} S_{13} S_{28} - k_{73} S_4 S_{40} + k_{75} S_{10} S_{41} + k_{76} S_0 S_{16} + k_{85} S_{10} S_{43} - k_{94} S_4 S_{63} - \\ & - k_{108} S_4 S_{34} - k_{120} S_4 S_{27} - k_{127} S_4 S_{27} + k_{131} S_{10} S_{81} - k_{132} S_4 S_{27} - k_{150} S_1 S_4 + k_{154} S_3 S_{10} - k_{155} S_4 S_{22}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_5}{\partial t} = & k_6 S_1 S_{25} + k_{93} S_1 S_{63} + k_{115} S_1 S_{75} + k_{116} S_1 S_{73} - k_{134} S_1 S_{42} + k_{135} S_1 S_{79} + k_{139} S_8 S_{10} + \\ & + k_{140} S_8 S_{12} + k_{147} S_1 S_8 + k_{148} S_1 S_{12} + k_{150} S_1 S_4 + k_{151} S_1 S_{22} + k_{152} S_1 S_{23} - k_{153} S_5 S_7 + k_{154} S_3 S_{10}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{\partial S_6}{\partial t} = k_{153} S_5 S_7, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_7}{\partial t} = & -k_3 S_7 S_{11} + k_{16} S_2 S_2 + k_{18} S_2 S_4 + k_{23} S_2 S_{28} - k_{38} S_7 S_{31} + k_{42} S_2 S_{29} + k_{44} S_2 S_{30} + \\ & + k_{47} S_2 S_{32} + k_{57} S_2 S_{36} + k_{61} S_2 S_{34} + k_{71} S_2 S_{39} + k_{74} S_2 S_{44} + k_{82} S_2 S_{52} + k_{83} S_2 S_{54} + k_{87} S_2 S_{45} + \\ & + k_{99} S_2 S_{65} + k_{101} S_2 S_{35} + k_{104} S_2 S_{58} + k_{129} S_2 S_{57} + k_{132} S_4 S_{27} + k_{142} S_2 S_{16} - k_{153} S_5 S_7, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{\partial S_8}{\partial t} = k_{137}^* S_1 - k_{138} S_0 S_8 - k_{139} S_8 S_{10} - k_{140} S_8 S_{12} - k_{141} S_8 S_{14} - k_{143} S_8 S_{18} - k_{147} S_1 S_8, \quad (19)$$

$$\frac{\partial S_9}{\partial t} = k_{141} S_8 S_{14} - k_{144} S_9 S_{12} - k_{145} S_9 S_{20} - k_{149} S_9 S_{10} + k_{147} S_1 S_8, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{10}}{\partial t} = & k_1^* S_{12} + k_4^* S_{12} + k_{34}^* S_{22} + k_{56}^* S_{36} - k_3 S_0 S_{10} S_{25} + k_9 S_{20} S_{25} + k_{10} S_{22} S_{25} + 2k_{11} S_{12} S_{25} + \\ & + k_{12} S_2 S_{25} + k_{13} S_4 S_{25} + k_{14} S_2 S_{12} + 2k_{17} S_4 S_{12} + k_{18} S_2 S_4 + k_{19} S_4 S_4 + k_{20} S_0 S_4 S_4 + k_{21} S_4 S_4 S_7 + \\ & + k_{24} S_{12} S_{21} + k_{29} S_{12} S_{20} + k_{30} S_4 S_{20} + k_{36} S_{20} S_{22} + k_{37} S_{22} S_{22} - k_{50} S_{10} S_{33} + k_{52} S_{23} S_{23} + k_{53} S_{23} S_{23} + \\ & + k_{54} S_4 S_{23} - k_{58} S_{10} S_{24} - k_{64} S_{10} S_{37} - k_{66} S_0 S_{10} S_{27} + k_{69} S_{42} S_{79} + k_{73} S_7 S_{40} - k_{75} S_{10} S_{41} - k_{78} S_{10} S_{41} + \\ & + k_{81} S_{81} + k_{84} S_{63} S_{63} - k_{85} S_{10} S_{43} + k_{94} S_4 S_{63} - k_{98} S_{10} S_{60} + k_{106} S_{42} S_{80} + k_{109} S_{23} S_{63} + k_{110} S_{23} S_{63} + \\ & + k_{112} S_{40} S_{40} + k_{113} S_{40} S_{40} + k_{114} S_{40} S_{40} + k_{119} S_{42} S_{42} + k_{120} S_4 S_{27} - k_{131} S_{10} S_{81} + k_{133} S_{12} S_{27} - \\ & - k_{139} S_8 S_{10} + k_{140} S_8 S_{12} + k_{142} S_2 S_{16} + k_{144} S_9 S_{12} - k_{146} S_9 S_{10} + k_{148} S_1 S_{12} - k_{154} S_3 S_{10} + k_{155} S_4 S_{22}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{13}}{\partial t} = & k_{27}^* S_{20} + k_{33}^* S_{22} + k_2 S_0 S_{11} + k_{16} S_2 S_2 - k_{67} S_{13} S_{33} - k_{68} S_{13} S_{28} - k_{86} S_{13} S_{58} - k_{100} S_{13} S_{61} + \\ & + k_{132} S_4 S_{27} + k_{139} S_8 S_{10} + k_{146} S_9 S_{10}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\frac{\partial S_{14}}{\partial t} = k_{60}^* S_{34} + k_{64} S_{10} S_{37} - k_{65} S_2 S_{14} - k_{141} S_8 S_{14}, \quad (23)$$

$$\frac{\partial S_{15}}{\partial t} = k_{65} S_2 S_{14} + k_{141} S_8 S_{14}, \quad (24)$$

$$\frac{\partial S_{16}}{\partial t} = k_{31} S_4 S_{20} - k_{45} S_{16} - k_{46}^* S_{16} - k_{76} S_0 S_{16} - k_{142} S_2 S_{16}, \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{20}}{\partial t} = & -k_{27}^* S_{20} + k_{33}^* S_{22} + k_{40}^* S_{31} + k_{43}^* S_{30} + k_{46}^* S_{16} + k_7 S_{21} S_{25} - k_8 S_{20} S_{25} - k_9 S_{20} S_{25} + \\ & + k_{10} S_{22} S_{25} + k_{24} S_{12} S_{21} + k_{26} S_4 S_{21} - k_{28} S_2 S_{20} - k_{29} S_{12} S_{20} - k_{30} S_4 S_{20} - k_{31} S_4 S_{20} + 2k_{32} S_{21} S_{22} - \\ & - k_{35} S_{20} S_{22} + 2k_{37} S_{22} S_{22} + k_{39} S_{31} + k_{42} S_2 S_{29} + k_{45} S_{16} + k_{51} S_{21} S_{23} + k_{70} S_{21} S_{40} + k_{72} S_{21} S_{42} + \\ & + k_{76} S_0 S_{16} + k_{91} S_{21} S_{63} - k_{92} S_{20} S_{63} + k_{95} S_{64} + k_{117} S_{21} S_{75} + k_{126} S_{21} S_{80} + k_{130} S_{21} S_{79} + \\ & + 2k_{136} S_{21} S_{83} + k_{140} S_2 S_{16} - k_{145} S_9 S_{20} + k_{151} S_1 S_{22} + k_{155} S_4 S_{22}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{21}}{\partial t} = & k_{27}^* S_{20} + k_{34}^* S_{22} + k_{41}^* S_{29} - k_7 S_{21} S_{25} + k_9 S_{20} S_{25} - k_{24} S_{12} S_{21} - k_{25} S_2 S_{21} - k_{26} S_4 S_{21} - \\ & - k_{32} S_{21} S_{22} + k_{36} S_{20} S_{22} - k_{51} S_{21} S_{23} - k_{70} S_{21} S_{40} - k_{72} S_{21} S_{42} - k_{91} S_{21} S_{63} - k_{117} S_{21} S_{75} - \\ & - k_{126} S_{21} S_{80} - k_{130} S_{21} S_{79} - k_{136} S_{21} S_{83} + k_{145} S_9 S_{20}, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{22}}{\partial t} = & -k_{33}^* S_{22} - k_{34}^* S_{22} + k_{40}^* S_{31} + k_8 S_{20} S_{25} - k_{10} S_{22} S_{25} + k_{29} S_{12} S_{20} - k_{32} S_{21} S_{22} - \\ & - k_{35} S_{20} S_{22} - k_{36} S_{20} S_{22} - 2k_{37} S_{22} S_{22} + k_{39} S_{31} + k_{44} S_2 S_{30} - k_{62} S_{22} S_{34} - k_{79} S_{22} S_{49} - \\ & - k_{89} S_{22} S_{45} - k_{151} S_1 S_{22} - k_{155} S_4 S_{22}, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\frac{\partial S_{27}}{\partial t} = k_{56}^* S_{36} + k_{59}^* S_{34} + k_{12} S_2 S_{25} + k_{65} S_2 S_{14} - k_{66} S_0 S_{10} S_{27} + k_{67} S_{13} S_{33} + \quad (29)$$

$$+ k_{97} S_{11} S_{38} - k_{120} S_4 S_{27} - k_{127} S_4 S_{27} - k_{132} S_4 S_{27} - k_{133} S_{12} S_{27},$$

$$\frac{\partial S_{28}}{\partial t} = -k_{22}^* S_{28} + k_{19} S_4 S_4 + k_{20} S_0 S_4 S_4 + k_{21} S_4 S_4 S_7 - k_{23} S_2 S_{28} - k_{68} S_{13} S_{28}, \quad (30)$$

$$\frac{\partial S_{29}}{\partial t} = -k_{41}^* S_{29} + k_{25} S_2 S_{21} + k_{30} S_4 S_{20} - k_{42} S_2 S_{29}, \quad (31)$$

$$\frac{\partial S_{30}}{\partial t} = -k_{43}^* S_{30} + k_{28} S_2 S_{20} + 2k_{38} S_7 S_{31} - k_{44} S_2 S_{30} + k_{62} S_{22} S_{34} + k_{89} S_{22} S_{45}, \quad (32)$$

$$\frac{\partial S_{31}}{\partial t} = -k_{40}^* S_{31} + k_{35} S_{20} S_{22} - k_{38} S_7 S_{31} - k_{39} S_{31}, \quad (33)$$

где (S_1 - S_{10} , S_{13} - S_{16} , S_{20} - S_{22} , S_{27} - S_{31}) – вектор массовых концентраций примесей (SO_2 , OH , HNO_3 , HO_2 , SO_3 , H_2SO_4 , H_2O , SO_2^* , SO , O_2 , O , CO , CO_2 , HNO_4 , NO_2 , NO , NO_3 , H , H_2O_2 , HNO_2 , HNO_3 , N_2O_5) соответственно [17];

S_0 , S_{11} , S_{12} , S_{18} , S_{19} , S_{23} - S_{25} , S_{32} - S_{45} , S_{49} , S_{52} , S_{54} , S_{57} , S_{58} , S_{60} , S_{61} , S_{63} - S_{65} , S_{73} , S_{75} , S_{79} - S_{81} , S_{83} – массовые концентрации примесей M , $O(^1D)$, O_3 , C_3H_6 , CH_3O_2 , CH_3O , $O(^3P)$, CH_4 , CH_3 , CH_2O , CH_3OH , CH_3OOH , HCO , H_2 , C_2H_6 , $C_2H_5O_2$, C_2H_5O , $n-C_3H_7O_2$, $n-C_3H_7O$, C_2H_5OOH , CH_3CHO , C_2H_4 , $HOCH_2CHO$, C_3H_8 , CH_3COCH_3 , CH_3SCH_3 , CH_3CO , CH_3SSCH_3 , CH_3CO_3 , $CH_3CO_3NO_2$, CH_3COO_2H , CH_3CHO_2 , CH_2O_2 , $CH_3COCH_2O_2$, $HOCH_2CHO_2CH_3$, CH_3COCH_2O , $O_2C_2H_4ONO_2$ соответственно; k_{ii} – константы скоростей реакций.

При решении системы уравнений кинетики используется модификация полуневяной двухшаговой схемы с хорошими стабилизирующими свойствами [6].

На рис. 2, 3 представлены результаты работы программного приложения.

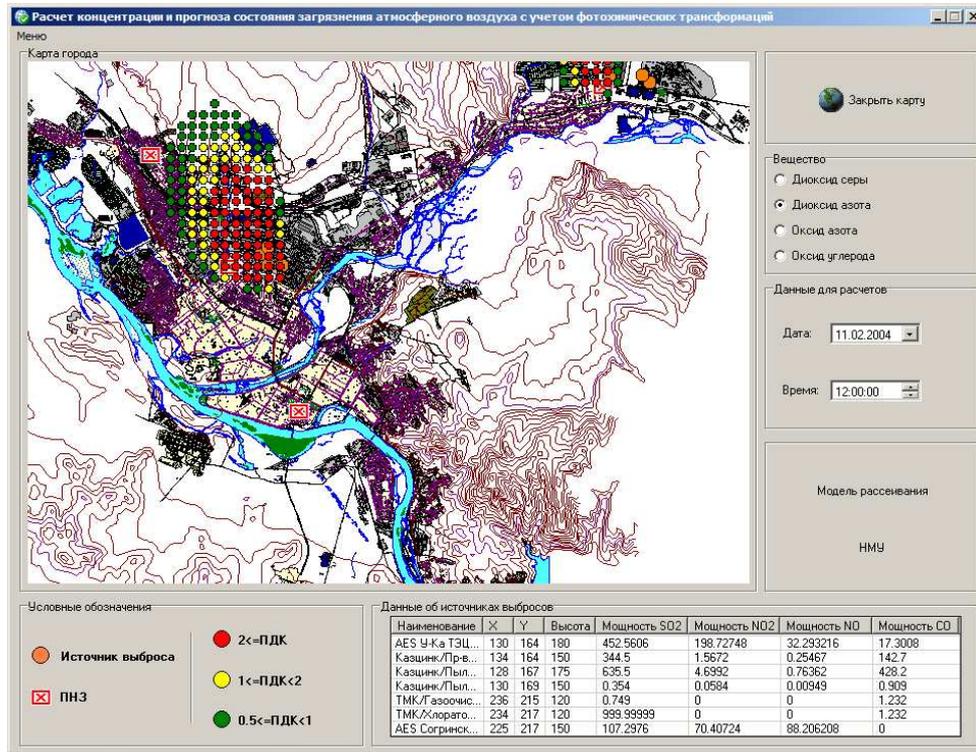


Рисунок 2 - Визуализация распространения примеси диоксида азота

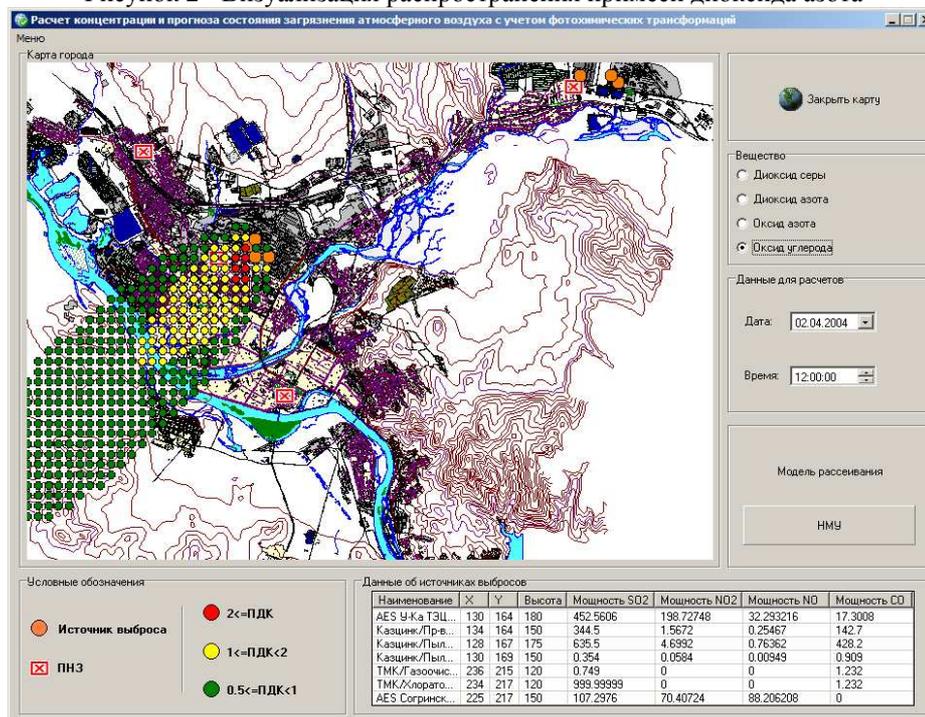


Рисунок 3 - Визуализация распространения примеси оксида углерода

Во ФГУП «НИИГРАФИТ» создают материалы с необычными свойствами. Например, силицированный графит. Это антифрикционный материал с коэффициентом трения, не превышающим 0,05, предназначенный для эксплуатации в экстремальных условиях. Ему не страшна даже температура 500 °С, он может работать при относительных скоростях скольжения 200 м/с и нагрузках до 15 МПа. Силицированный графит не теряет работоспособности в растворах щелочей, кислот, включая плавиковую, и даже в расплавах металлов.

Из него изготавливают уплотнительные кольца, подшипники и подпятники скольжения для насосов, химических реакторов и другого оборудования.

Другой антифрикционный материал – фторопласт с добавками искусственного графита. Для работы ему не нужна смазка, и хотя он не так стоек к внешним воздействиям, как силицированный графит (рабочая температура ограничена 180 °С, а скорость скольжения 5 м/с), но обладает другими весьма ценными свойствами. Так, он химически чрезвычайно инертен, поэтому детали из него можно использовать в медицинском оборудовании и при изготовлении пищевых продуктов.

Материал выпускается в заготовках, представляющих собой толстостенные трубки (толщина стенок 15 мм) с наружным диаметром 50 мм.

«Наука и жизнь» № 3, 2011