



УДК 551.510.42(571.53)

Оценка загрязнения воздушной среды г. Иркутска автотранспортом

А. В. Аргучинцева (arg@math.isu.ru)
В. К. Аргучинцев (avk@geogr.isu.ru)
С. А. Новикова (novikovasveta41@mail.ru)

Аннотация. Рассматривается проблема загрязнения атмосферного воздуха г. Иркутска автотранспортными средствами. На основе математической модели строятся области распространения загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух от автомобилей на участке дороги. Оценивается уровень загрязнения атмосферного воздуха на территории, прилегающей к предприятию «Иркутский аэропорт».

Ключевые слова: город, загрязнение, атмосфера, автотранспорт, моделирование.

Введение

В городах автотранспорт является одним из наиболее значимых загрязнителей окружающей среды. Не является исключением и г. Иркутск, в котором количество автотранспорта постоянно возрастает, доля старых машин с эксплуатацией свыше десяти лет велика. Плохое качество дорог и дорожного покрытия, постоянно разрушающегося из-за больших перепадов температур; отсутствие развязок; узкие улицы, загруженные с утра до вечера с обеих сторон припаркованным автотранспортом; отсутствие подземных парковок – все это приводит к недостаточной пропускной способности, возникновению автомобильных пробок, часто повторяющимся циклам торможения и трогания с места (во время работы на холостом ходу выброс ингредиентов увеличивается примерно в шесть раз по сравнению с выбросом движущегося автомобиля). В выхлопных газах содержится свыше 200 различных загрязняющих ингредиентов, наиболее токсичными из которых являются оксид углерода, сажа, формальдегид. Попадая в атмосферу из низко расположенных труб глушителей, они рассеиваются на уровне дыхания детей и взрослого человека.

На рассеяние примесей в условиях города существенно влияют планировка улиц, их ширина и направление, высота зданий, наличие зеленых массивов – все, что образует как бы разные формы наземных препятствий воздушному потоку и приводит к возникновению локальных метеорологических условий в городе.

Наблюдения показывают, что даже при постоянных объемах и составах транспортных выбросов в результате влияния метеорологических условий уровни загрязнения воздуха могут различаться в несколько раз. Учет этого влияния важен при подготовке документов о качестве атмосферного воздуха, разработке воздухоохраных мероприятий, планировании размещения городов и промышленных объектов, прогнозировании уровня загрязнения.

В связи с этим при оценке эффективности выполнения мероприятий по охране атмосферного воздуха недостаточно иметь только сведения о сокращении выбросов. Требуется надежная информация за длительный период о содержании примесей в атмосфере и климатических условиях их распространения в атмосфере [3; 6].

Объекты исследования и подготовка данных

На первом этапе были проведены расчеты по методике [5], которая используется для оценки загрязнения воздушной среды движущимся автотранспортным потоком на участке автодороги. Данная методика устанавливает порядок расчета и определения выбросов автотранспорта для их использования при проведении сводных расчетов загрязнения атмосферы городов; может быть применена ко всем категориям автотранспортных средств при эксплуатации в городских условиях. В качестве исходных данных для расчета выбросов автотранспорта в атмосферу на действующих автодорогах используются результаты натурных обследований структуры и интенсивности автотранспортных потоков с подразделением по основным группам автотранспортных средств.

Осенью 2013 г. нами проведены натурные наблюдения по изучению автотранспортных потоков (интенсивности движения) на участке автодороги ул. Ширямова (в районе аэропорта г. Иркутска). Ситуационный план исследуемой территории представлен на рис. 1. Наблюдения проводились за автомобилями трех категорий: грузовые, легковые, автобусы (маршрутные такси). Подсчет проходящих по данному участку автодороги транспортных средств проводится в течение 20 мин в часы: 8.30–8.50, 13.20–13.40, 18.20–18.40. Подсчет проходящих по обследуемому участку транспортных средств проводился с использованием видеозаписывающего устройства (видеокамеры) (табл. 1).

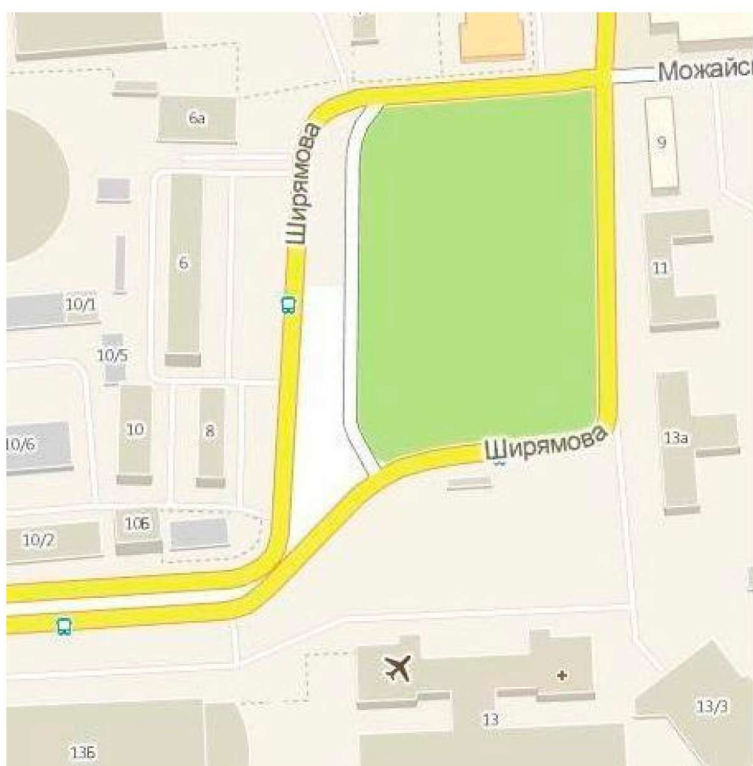


Рис. 1. Ситуационная карта-схема исследуемой территории

В табл. 1 представлены данные видеонаблюдения в будние дни в часы пик на участке дороги ул. Ширямова.

Таблица 1

Данные наблюдений в будние дни на участке дороги ул. Ширямова

Тип автотранспортных средств	Со стороны аэропорта	В сторону аэропорта	Сумма
Время: 8.30 – 8.50			
Легковые автомашины	388	448	836
Автобусы, маршрутные такси	12	18	30
Грузовые автомашины	20	25	45
Время: 13.20 – 13.40			
Легковые автомашины	380	454	834
Автобусы, маршрутные такси	13	16	29
Грузовые автомашины	21	27	48
Время: 18.20 – 18.40			
Легковые автомашины	398	444	842
Автобусы, маршрутные такси	19	18	37
Грузовые автомашины	18	41	59

Как видно из табл. 1, в наблюдаемые сроки (утро, день, вечер) количество всех видов автотранспорта почти одинаковое (разброс обусловлен некоторой случайностью появления машин и возможными погрешностями счета).

По методике [5] были проведены расчеты выбросов СО в атмосферный воздух от автотранспортных средств трех категорий (легковые, грузовые, автобусы и маршрутные такси).

Выброс i -го загрязняющего вещества (г/с) движущимся автотранспортным потоком на автодороге (или ее участке) с фиксированной протяженностью L (км) рассчитывался по формуле:

$$M_{L_i} = \frac{L}{1200} \sum_1^k M_{k,i}^L \cdot G_k \cdot r_{V_{k,i}} \text{ г/с,}$$

где $M_{k,i}^L$ (г/км) – удельный пробеговый выброс i -го вредного вещества автомобилями k -й группы, определяемый по табл. 2; k – количество групп автомобилей; G_k – фактическая наибольшая интенсивность движения, т. е. количество автомобилей каждой из k групп, проходящих через фиксированное сечение выбранного участка автодороги в единицу времени (20 мин) в обоих направлениях по всем полосам движения; $r_{V_{k,i}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий среднюю скорость движения транспортного потока ($V_{k,i}$, км/ч на выбранной автодороге (или ее участке), определяемый по табл. 3); L (км) – протяженность автодороги (или ее участка), из которого исключена протяженность очереди автомобилей перед запрещающим сигналом светофора, включающая длину соответствующей зоны перекрестка (для перекрестков, на которых проводились дополнительные обследования).

Таблица 2

Удельные пробеговые выбросы загрязняющих веществ $M_{k,i}^L$ (г/км) для различных групп автомобилей

Наименование группы автомобилей	№ группы	В ы б р о с , г/км						
		О	NO ₂	СН	Сажа	SO ₂	Формальдегид	Бенз(а)-пирен
Легковые	I	3,5	0,9	0,8	0,7·10 ⁻²	1,5·10 ⁻²	3,2·10 ⁻³	0,3·10 ⁻⁶
Автофургоны и микроавтобусы, до 3,5 т	II	8,4	2,1	2,4	3,8·10 ⁻²	2,8·10 ⁻²	8,4·10 ⁻³	0,8·10 ⁻⁶
Грузовые, от 3,5 до 12 т	III	6,8	6,9	5,2	0,4	5,1·10 ⁻²	2,2·10 ⁻²	2,1·10 ⁻⁶
Грузовые, свыше 12 т	IV	7,3	8,5	6,5	0,5	7,3·10 ⁻²	2,5·10 ⁻²	2,6·10 ⁻⁶
Автобусы, свыше 3,5 т	V	5,2	6,1	4,5	0,3	4,2·10 ⁻²	1,8 · 10 ⁻²	1,8·10 ⁻⁶

Таблица 3

Значения коэффициентов $r_{vk,l}$, учитывающих изменения количества выбрасываемых вредных веществ в зависимости от средней скорости движения

К	Скорость движения V, км/ч														
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	100	110
$r_{vk,l}$	1,4	1,35	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,75	0,65	0,50	0,30	0,40	0,50	0,65	0,75
$r_{vk,l}$ NO ₂	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2

Удельные выбросы загрязняющих веществ представляют собой усредненные для рассматриваемых групп автомобилей значения удельных выбросов загрязняющих веществ при их движении на участках городских автомагистралей, а также в условиях их пребывания на пересечениях городских автомагистралей. При назначении удельных выбросов загрязняющих веществ для автомагистралей принималось во внимание то, что в городских условиях автомобиль на конкретном участке автодороги совершает непрерывные разгоны и торможения, перемещаясь с некоторой средней скоростью, определяемой дорожными условиями.

В табл. 4 приведены данные по выбросам CO движущимися автотранспортными средствами на участке дороги ул. Ширямова, рассчитанные по формулам, представленным выше [5]. Из таблицы видно, что максимальное количество выбросов приходится на легковые автомобили, что прямо пропорционально количеству автотранспортных средств, зафиксированных на данном участке дороге при натурных наблюдениях.

Таблица 4

Выбросы CO движущимися автотранспортными средствами на участке дороги ул. Ширямова

Тип автотранспортного средства	Выброс CO, мг/с
Легковые	490
Автобусы	40
Грузовые	60

Моделирование загрязнения

Для описания ветровых потоков в городе предлагается численная модель мезомасштабных процессов, базирующаяся на основе системы гидротермодинамических уравнений, выражающих основные законы сохранения энергии, импульса и массы [1; 2]. Это уравнение движения:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}p - 2\vec{\omega} \times \vec{v} + \vec{g} + D\vec{v}, \quad (1)$$

уравнение неразрывности:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \text{div}\vec{v} = 0, \quad (2)$$

уравнение притока тепла:

$$\frac{dT}{dt} - \frac{1}{c_p \rho} \frac{dp}{dt} = DT, \quad (3)$$

уравнение состояния, записанное в общем виде:

$$p = R\rho T, \quad (4)$$

уравнение баланса кинетической энергии турбулентности:

$$\frac{db}{dt} = k_z \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + c_m \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right] - \varepsilon + Db, \quad (5)$$

уравнение скорости диссипации турбулентной энергии:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = c_{1\varepsilon} k_z \frac{\varepsilon}{b} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + c_m \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right] - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{b} + D\varepsilon, \quad (6)$$

соотношение Колмогорова:

$$k_z = cb^2 / \varepsilon,$$

соотношение Смагоринского:

$$k_x = k_y = L^2 \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2},$$

где

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z};$$

$$D\Psi = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial \Psi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial \Psi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} c_\psi k_z \frac{\partial \Psi}{\partial z}.$$

Здесь Ψ – любая из функций рассматриваемой задачи; t – время; x, y, z – оси декартовой прямоугольной системы координат; u, v – горизонтальные и w – вертикальная компоненты вектора \vec{v} скорости движения воздуха; ρ – плотность атмосферы; p – давление; T – температура; $\vec{\omega}$ – вектор угловой скорости вращения Земли, направленный параллельно оси Земли к Северному полюсу; \vec{g} – сила тяжести; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; R – газовая постоянная сухого воздуха; b – кинетическая энергия турбулентности; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; k_x, k_y, k_z – коэффициенты турбулентного обмена по горизонтали и вертикали; c, c_ψ – эмпирические константы; $c_u = c_v = c_w = 1$; $L = k_0 \cdot \Delta s / 2$; L – масштаб, пропорциональный шагу горизонтальной сетки Δs ; k_0 – безразмерный параметр, аналогичный постоянной Кармана.

Система уравнений рассматривается в параллелепипеде $\Omega_{\{x,y,z: 0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, 0 \leq z \leq h\}}$, где $x=0, x=X, y=0, y=Y, z=0, z=Z$ – границы области счета. Краевые условия задаются по данным наблюдений.

Уравнения модели (1)–(6) интегрируются в декартовой прямоугольной системе координат с применением метода фиктивных областей, который позволяет проводить расчеты в условиях городской застройки. Численный алгоритм решения строится на основе метода расщепления по физическим процессам и геометрическим переменным [4].

Найденные на основе системы (1)–(6) скорости движения и турбулентные характеристики используются для решения дифференциального уравнения переноса и турбулентной диффузии примесей:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \text{div}(s\vec{v}) - w_g \frac{\partial s}{\partial z} = Ds - \alpha s + Q, \quad (7)$$

где s – концентрация любой субстанции; α – коэффициент неконсервативности примеси; $Q(x, y, z, t)$ – функция, описывающая распределение и мощности источников рассматриваемой субстанции; w_g – скорость гравитационного осаждения аэрозолей, определяемая по формуле Стокса [14]:

$$w_g = (2\rho_n g r^2) / (9\rho\nu),$$

ρ_n и r – соответственно плотность и радиус частицы взвеси; g – ускорение свободного падения; ρ и ν – плотность и вязкость воздуха.

Из-за отсутствия детальной информации из наблюдений в качестве начальных условий принимается $s = 0$. На границах области счета по горизонтальным осям и при $z = 100$ м задаются условия Неймана, на уровне подстилающей поверхности – учитывается отражение и поглощение примеси в зависимости от свойств подстилающей поверхности.

Уравнение (7) решается численно методом расщепления [4].

Расчеты проводились для крупномасштабных потоков различных направлений при следующих значениях параметров: шаг по времени выбирался с учетом критерия Куранта; вертикальный градиент фоновой температуры – ($-0,65$ °C/100 м); верхняя граница области счета задавалась на высоте 100 м; шаги по горизонтали и вертикали 2 м; горизонтальное разрешение 100×50 точек.

В качестве иллюстрации приведем фрагменты расчетов загрязнения атмосферы над выбранным участком автомагистрали при общем глобальном переносе, обеспечиваемом ветрами направлений: восточного (рис. 2), западного (рис. 3) и наиболее повторяющегося – северо-западного (рис. 4). Из рисунков видно, как ориентация улиц и зданий изменяют направления ветров.

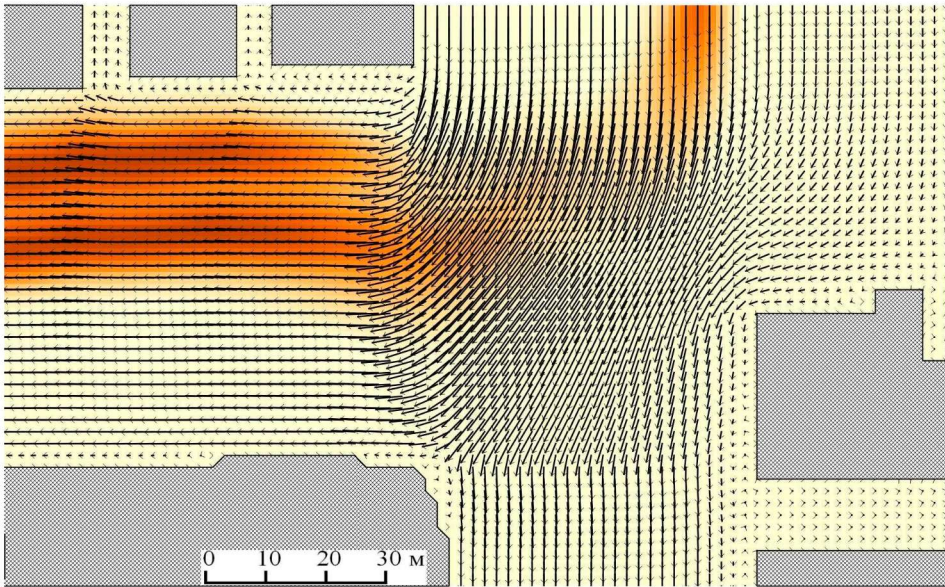


Рис. 2. Векторное поле скорости при восточном переносе и концентрации CO.
Область сгущения краски – концентрации более 3 мг/м^3

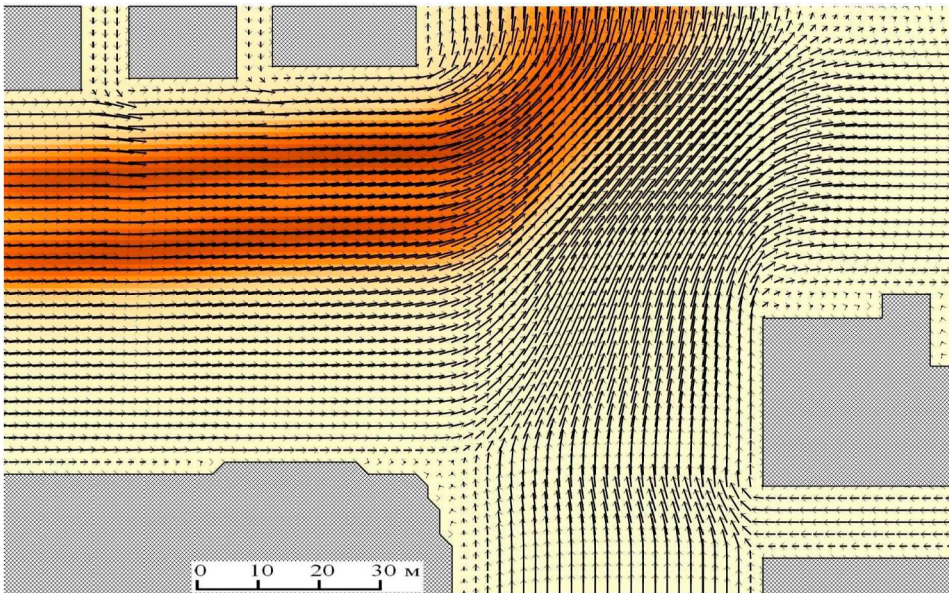


Рис. 3. Векторное поле скорости при западном переносе и концентрации CO.
Область сгущения краски – концентрации более 3 мг/м^3

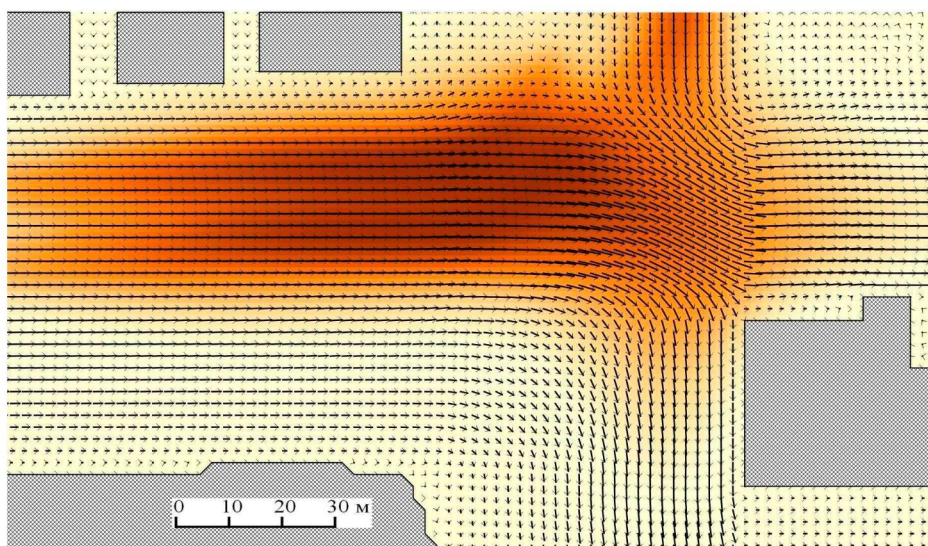


Рис. 4. Векторное поле скорости при северо-западном переносе и концентрации СО. Область сгущения краски – концентрации более 3 мг/м^3

Выводы

Используемая в работе численная модель [1, 2] является более универсальной по сравнению со стандартными методиками, поскольку она основана на наиболее полных уравнениях гидротермодинамики атмосферы с учетом динамических уравнений турбулентности. Кроме того, модель может быть применена и для исследования загрязнения атмосферного воздуха в особо опасных ситуациях, близких к штилевым.

Возможности модели и получаемые результаты могут быть использованы для создания экологических паспортов и для принятия управленческих решений по уменьшению негативного влияния транспорта на экологическую ситуацию промышленных городов. Среди таких мероприятий – это прежде всего приведение в надлежащий порядок городских магистралей (расширение улиц; асфальтирование; хорошее качество покрытия; устранение многочисленных «лежачих полицейских», выполненных в грубой форме с нарушениями техники безопасности; многоярусное озеленение), контроль за выбросами отработанных газов автомобилей в соответствии с действующими государственными стандартами, выпуск на линию автотранспортных средств в соответствии с действующими стандартами.

Список литературы

1. Аргучинцев В. К. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса антропогенных примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал / В. К. Аргучинцев, А. В. Аргучинцева. – Иркутск : РИО ИГУ, 2007. – 255 с.

2. Моделирование и управление процессами регионального развития / А. В. Аргучинцева [и др.]. – М. : Наука, Физматлит, 2001. – 432 с.

3. Базаров И. П. Термодинамика / И. П. Базаров. – М. : Высш. шк., 1991. – 375 с.

4. Марчук Г. И. Приоритеты глобальной экономики / Г. И. Марчук, К. Я. Кондратьев. – М. : Наука, 1992. – 263 с.

5. Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов. – СПб., 2010. – 15 с.

6. Яблокова Е. П. Экологические проблемы автомобильного транспорта : аналит. обзор / Е. П. Яблокова ; ГПНТБ СО РАН. – Новосибирск : Север, 2005. – 113 с.

Estimating of Air Pollution Due to Emissions by Transport in Irkutsk

A. V. Arguchintseva, V. K. Arguchintsev, S. A. Novikova

Annotation. The article is devoted to the problem of air pollution due to emissions of pollutants from transport of Irkutsk. Of the basis of mathematical model we are building area of pollution is distribution from transport of Irkutsk. Also we are assessing the level of air pollution in area, which located near Irkutsk airport.

Key words: city, pollution, atmosphere, transport, modeling.

Аргучинцева Алла Вячеславовна
доктор технических наук, профессор,
Иркутский государственный университет
664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1
декан географического факультета
тел.: (395–2) 42–56–84

Arguchintseva Alla Vyacheslavovna
Doctor of Technical Sciences, professor
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
Dean, Faculty of Geography
tel.: (395–2) 42–56–84

Аргучинцев Валерий Куприянович
доктор технических наук, профессор,
Иркутский государственный университет
664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1
зав. кафедрой метеорологии
и охраны атмосферы
тел.: (395–2) 52–10–94, 52–10–88

Arguchintsev Valery Kupriyanovich
Doctor of Technical Sciences, professor
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
Head of the Department of Meteorology
and protection of the atmosphere
tel.: (395–2) 52–10–94, 52–10–88

Новикова Светлана Александровна
аспирант
Иркутский государственный университет
664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: 8(9086) 61–58–58

Novikova Svetlana Alexsandrovna
Post-Graduate Student
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel.: 8(9086) 61–58–58