

УДК 551.509.328

## **Методика интерполяции кусочно-линейных данных об эмиссиях автотранспорта на регулярную модельную сетку**

***Ю.В. Ткачева***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
tkacheva.j@mail.ru*

Усвоение региональных данных о выбросах загрязняющих веществ в атмосферу является одним из способов улучшения качества расчетов воздушного загрязнения с использованием химической транспортной модели. Обсуждается разработанная методика интерполяции данных об эмиссиях автотранспорта, представленных на линейных участках транспортной сети г. Москвы, на регулярную модельную сетку. Методика предусматривает масштабирование расчетов на сетку с горизонтальным шагом 2 км, 1 км и менее км. Приведены примеры реализации методики, а также визуализированные поля актуальных эмиссий городского автотранспорта.

*Ключевые слова:* методология, эмиссии автотранспорта, химическая транспортная модель, горизонтальное разрешение сетки, регридинг, интерполяция, метод взвешенных расстояний.

## **Methodology of interpolating piecewise linear data on vehicle emissions on a regular model grid**

***Yu. V. Tkacheva***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
tkacheva.j@mail.ru*

The assimilation of regional data on emissions of pollutants into the atmosphere is a way to improve the quality of air pollution calculations using a chemical transport model. The developed methodology for interpolating data on motor transport emissions presented on linear sections of the Moscow transport network on a regular model grid is discussed. The methodology involves scaling the calculations on a grid with a horizontal step of 2 km, 1 km or less than one km. Examples of the implementation of the methodology are presented, as well as visualized fields of actual emissions of city motor transports.

*Keywords:* methodology, emissions of motor transport, chemical transport model, horizontal grid resolution, regridding, interpolation, inverse distance weighting method

### **Введение**

Из-за высокой неоднородности источников антропогенного загрязнения концентрации загрязняющих веществ в приземном городском воздухе характеризуются большими градиентами. Моделирование загрязнения воздуха в большом городе становится возможным лишь при высоком разрешении численных моделей, позволяющем учитывать мелкомасштабное

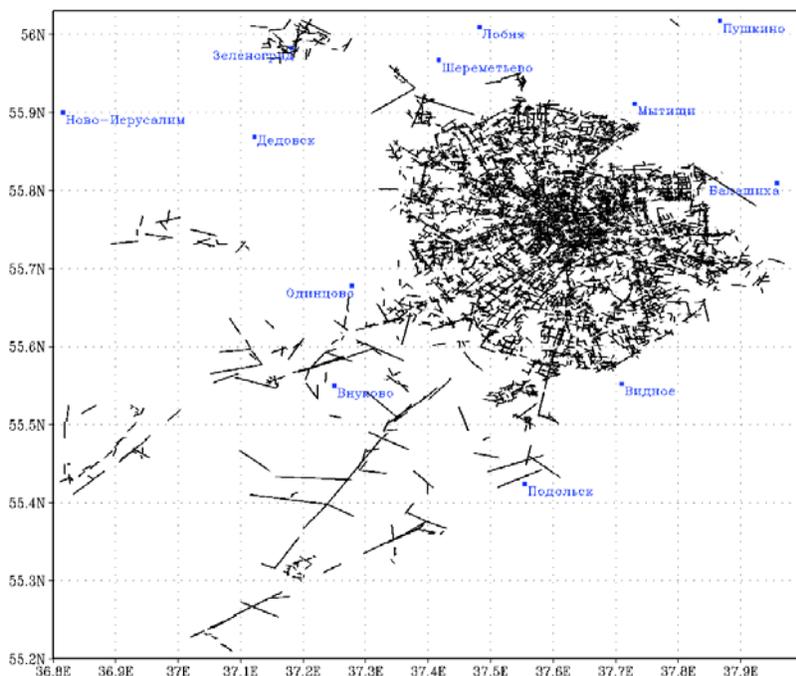
влияние нерегулярных источников загрязнения, к которым относится автомобильный транспорт. Современное состояние вычислительной техники и быстрое развитие химико-транспортных моделей (ХТМ) позволяют рассчитывать концентрации загрязняющих веществ по сетке высокого горизонтального разрешения, достаточного для учета локальных выбросов сеточного масштаба [3, 4, <http://climaterussia.ru/chistye-tehnologii/aerostatekachestvo-vozduha-kak-novaya-pogoda>]. При этом возникает потребность в получении достоверных данных о выбросах загрязняющих веществ на городских и прилегающих территориях.

Данные об эмиссиях антропогенных загрязнений, необходимые для проведения расчетов мезомасштабными ХТМ, формируются на основе статистических отчетов и методических расчетов в виде кадастров; наиболее известными из них являются базы данных открытого доступа EDGAR, ЕМЕР. При том, что эти базы данных используются ХТМ и позволяют рассчитать концентрации примесей на достаточно удовлетворительном уровне, улучшение качества модельных расчетов тесно связано с региональной адаптацией, а также с уточнением объема и структуры выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

В настоящей работе рассматривается один из способов уточнения региональных эмиссий, представляющий собой усвоение актуальных данных, т. е. эмиссий, рассчитанных по информации о реальных источниках загрязнения. Таковыми являются данные о выбросах загрязняющих веществ автомобильным транспортом в г. Москве, полученные по описанной в [1] методике.

Известно, что около 80 % загрязнения городского воздуха составляют выбросы автомобильного транспорта. Выбросы загрязняющих веществ от автомобильного транспорта достаточно специфичны, поскольку зона существенного загрязнения (согласно Гауссову распределению) обычно сосредоточена в узкой полосе, порядка нескольких десятков – сотен метров от автотрассы. Все названные факторы учитывались при разработке методики представления эмиссий автотранспорта на регулярной модельной сетке.

**Методика.** Расчетные эмиссии загрязняющих веществ от автомобильного транспорта определены для линейно-кусочных участков автодорог г. Москвы. Они включают выбросы двух десятков веществ, основная доля которых приходится на окись углерода (СО), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), неметановые углеводороды. База данных актуальных выбросов автотранспорта (БД АВА) содержит информацию более чем по 22 тыс. участков автодорог, географические координаты начальных и конечных пунктов линейных участков дорог (с учетом одностороннего и двустороннего движения), а также значения эмиссий на этих участках. На основе данных БД АВА с использованием графических инструментов выполнена визуализация всех линейных участков автодорог (рис. 1).



**Рис. 1.** Участки автомобильных дорог с данными выбросов автотранспорта, г. Москва.

**Fig. 1.** Road sections with motor transport emissions data, Moscow.

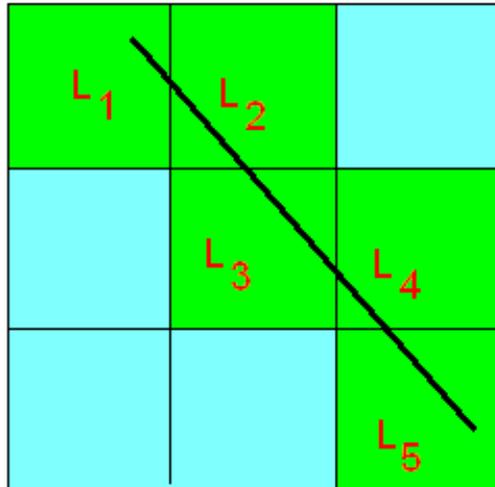
На первом этапе разработки методики проведена структуризация всех данных АВА с преобразованием их в единый формат, удобный для вычислительной обработки. На следующем этапе решалась задача преобразования неравномерно распределенных кусочно-линейных эмиссий в регулярную сетку с шагом 2 км. В англоязычной научной литературе процедура построения регулярной прямоугольной сетки на основе сети нерегулярных точек получила название *гриддинг* (*gridding*). Вариантов решения данной задачи может быть несколько. В данной работе описаны методы, позволяющие, с одной стороны, максимально учесть выбросы от автотранспорта, а с другой стороны, автоматизировать методику и предусмотреть возможность масштабирования, т. е. изменения горизонтального разрешения, и учета дополнительных факторов.

Ниже описан алгоритм реализации методики гриддинга выбросов автомобильного транспорта.

**Алгоритм.** Для преобразования данных выбросов загрязняющих веществ от автомобильного транспорта в регулярную сетку с шагом 2 км строится «мелкая» сетка с горизонтальным разрешением 100 м (рис. 2). Для каждого линейного участка автомобильной дороги по географическим координатам начального и конечного пунктов выбираются ячейки

“мелкой” сетки, через которые она проходит (квадраты зеленого цвета). В каждой ячейке вычисляется доля автомобильной дороги, приходящаяся на данную ячейку ( $L_i$ ,  $i = 1,5$ ). Общая длина дороги ( $L$ ) для данного примера

равна: 
$$L = \sum_{i=1}^5 L_i .$$



**Рис. 2.** Ячейки сетки, через которые проходит автомобильная дорога.

**Fig. 2.** Grid cells through which the automobile road passes.

По вычисленной доле автомобильной дороги, проходящей через данную ячейку, определяются выбросы, соответствующие данной ячейке ( $E_i$ ). При этом рассчитывается долевой коэффициент ( $\delta_i$ ), показывающий, какая часть суммарных выбросов приходится на данную ячейку.  $E$  на всей дороге приходится на данную ячейку:

$$E_i = \frac{L_i E}{\sum_{i=1}^n L_i} = \delta_i \cdot E ; \quad \delta_i = \frac{L_i}{L} ,$$

где  $L_i$  – длина участка автодороги в границах ячейки  $i$ ;  $L = \sum_{i=1}^n L_i$  – общая

длина дороги, проходящей через ячейки  $1 \leq i \leq n$ ;  $n$  – число ячеек, через которые проходит дорога;  $\delta_i$  – доля участка дороги  $L_i$  в ячейке  $i$  от общей длины дороги  $L$ .

Эмиссии загрязняющих веществ ( $E$ ), измеренные на автомобильной дороге, равны сумме эмиссий на отдельных участках, разбиваемых границами ячеек ( $E_i$ ):

$$E = \sum_{i=1}^n E_i .$$

Процедура расчета эмиссий повторяется для всех линейных участков автомобильных дорог, представленных в БД АВА. Предполагается, что распределение выбросов загрязняющих веществ в ячейке “мелкой” сетки однородно, а полученное значение эмиссии относится к центру ячейки.

Для получения значений во всех узлах регулярной “мелкой” сетки с горизонтальным шагом 100 м применяется один из методов интерполяции – метод обратных квадратов. Интерполяция основана на предположении: чем ближе расположены точки, тем больше похожи их свойства, и наоборот.

Метод обратных взвешенных расстояний позволяет рассчитать значение каждой ячейки раstra, усредняя значения опорных точек в заданной окрестности данной ячейки. При этом выполняется условие: ближайшая к центру расчетной ячейки точка вносит больший вклад (вес) в интерполируемое значение, чем более удаленная.

Вес каждой опорной точки – обратная функция расстояния в некоторой степени ( $w_i$ ):

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n w_i E_i}{\sum_{i=1}^n w_i} ,$$

где  $E$  – рассчитываемое средневзвешенное значение эмиссии загрязняющих веществ обрабатываемой ячейки;  $E_i$  – значения эмиссии загрязняющих веществ опорных точек, попавших в заданную окрестность;  $w_i$  - рассчитываемый вес  $i$ -ой точки – обратная функция расстояния (например, в нашем случае  $w_i = \frac{1}{r_i^2}$ ,  $r_i$  – расстояние от точки интерполяции до  $i$ -ой точки).

Чем больше степень обратной функции расстояния, тем большее влияние имеют ближайшие точки и меньшее – удаленные. В результате поверхность становится более детальной и менее сглаженной. В данной задаче применена обратная квадратичная зависимость, поскольку рассеивание загрязняющих веществ при удалении от источника имеет близкую функциональную зависимость (Гауссово распределение).

Для расчета значений в заданной ячейке используется фиксированный радиус с указанием минимального количества точек для интерполяции. Ниже приведен конкретный пример интерполяции  $E$  в точке по пяти окружающим точкам, где значения известны (рис. 3).

На рис. 3 квадраты, в которых заданы значения выбранного параметра, окрашены оттенками синего цвета с центральными точками зеленого цвета, а желтый квадрат с красной точкой – узел, в котором надо получить интерполированное значение. Рядом со значениями функции в отмеченных точках указаны расстояния от точки интерполяции до этих точек ( $ds$ ).

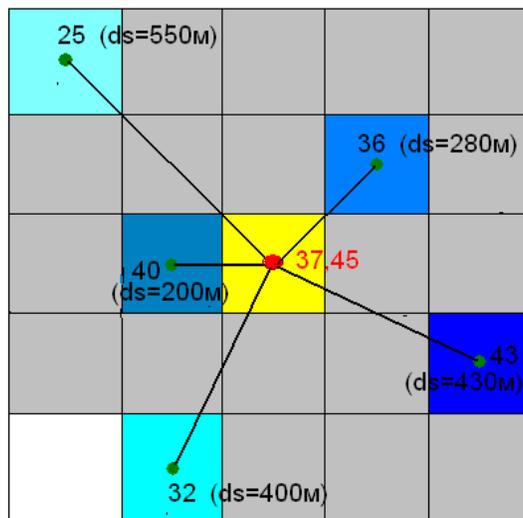


Рис. 3. Схема интерполяции в заданной точке.

Fig. 3. The interpolation scheme at a given point.

Ниже приводится пример вычисления методом обратных квадратов:

$$w = \sum_{i=1}^5 \frac{1}{ds_i} = \frac{1}{200^2} + \frac{1}{550^2} + \frac{1}{280^2} + \frac{1}{430^2} + \frac{1}{400^2} = 1,27 \cdot 10^{-5}.$$

Эмиссии загрязняющих веществ:

$$E = \frac{40}{200^2} + \frac{25}{550^2} + \frac{36}{280^2} + \frac{43}{430^2} + \frac{32}{400^2} = 37,45.$$

Более подробное описание метода интерполяции обратных квадратов можно найти в [2, 5], а программную реализацию можно выполнить самостоятельно или воспользоваться стандартными системными библиотеками. Поскольку программные пакеты, которые имеются в свободном доступе, требуют преобразования под данную специфическую задачу, для реализации методики был написан самостоятельный программный продукт.

После проведения всех необходимых вычислений и заполнения ячеек “мелкой” сетки с шагом 100 м начинается заполнение сетки с горизонтальным разрешением 2 км. Для этого проводится суммирование эмиссий загрязняющих веществ ячеек “мелкой” сетки, входящих в ячейку крупной сетки с шагом 2 км, учитывая их весовые коэффициенты. Процедура подобных вычислений по всей территории позволяет получить данные эмиссий загрязняющих веществ от автотранспорта в регулярной сетке с горизонтальным разрешением 2 км.

**Реализация методики.** Написанный программный пакет реализован для операционных систем Linux и Windows на языке FORTRAN 90.

Методика максимально автоматизирована, для ее реализации требуется задать следующие параметры:

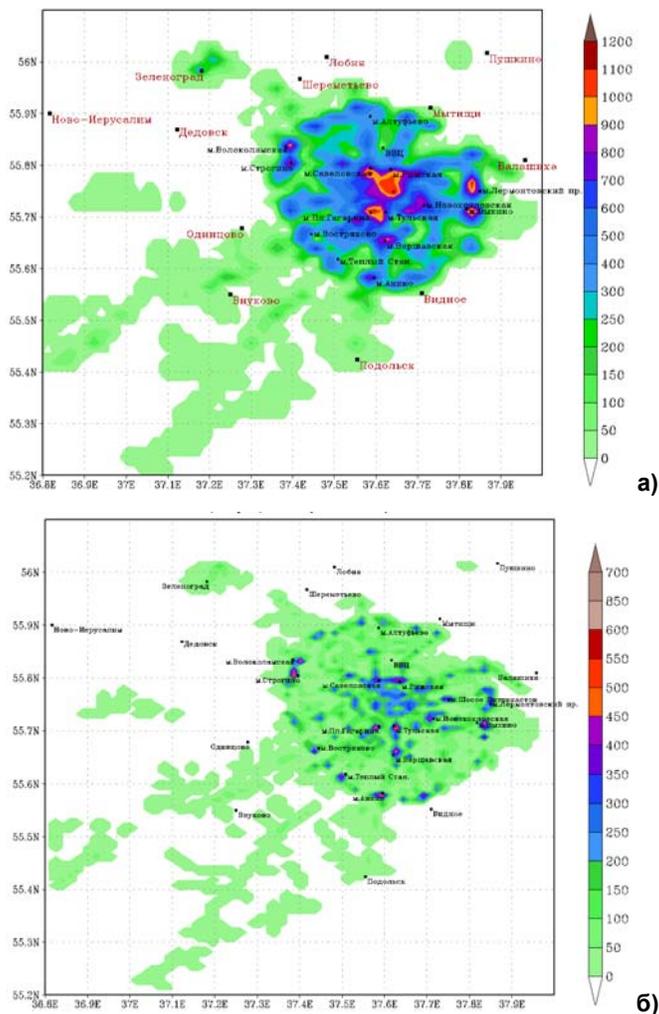
1. Географические координаты линейных участков автодорог и значения эмиссий загрязняющих веществ.
2. Горизонтальное разрешение регулярной сетки (в данном случае 2 км).
3. Размерность регулярной сетки.
4. Географические координаты узлов регулярной сетки.
5. Формат выходных данных.

Такой набор входных данных не привязан к определенной вычислительной модели, поэтому позволяет использовать данную методику для прогностических моделей с разными пространственными сетками.

На выходе программного пакета получаем значения функции в узлах заданной регулярной сетки с требуемым горизонтальным разрешением. При необходимости можно изменять и расширять список задаваемых параметров.

**Результаты.** Регридинг по разработанной методике был выполнен для сеток с шагами по горизонтали: 500 м; 1 км; 2 км. На рис. 4 показаны примеры регридинга в регулярные горизонтальные сетки с разрешением 2 км и 1 км.

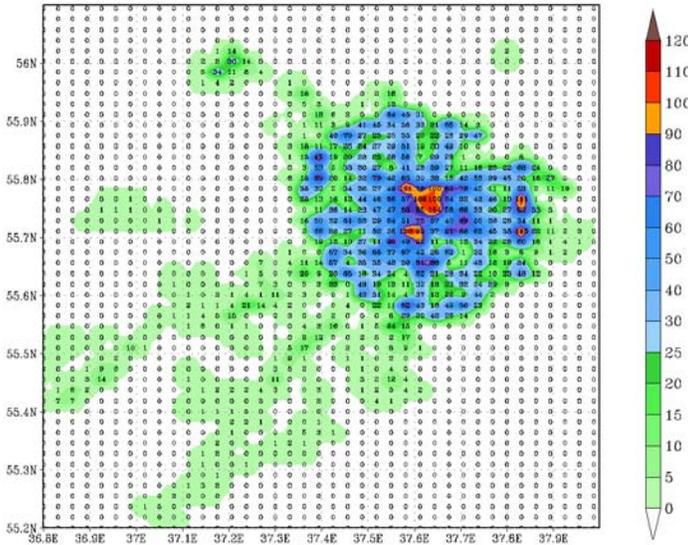
Анализ рис. 4 а, б показывает, что сетка с шагом 1 км лучше учитывает расположение автодорог, а значит, и распределение по территории города эмиссий автотранспорта. Но сегодня вычислительные возможности Гидрометцентра России позволяют проводить расчеты ХТМ с горизонтальным шагом 2 км. Это связано с тем, что увеличение разрешения модели сопряжено с увеличением времени счета ХТМ. Так, уменьшение шага сетки в 2 раза увеличивает количество расчетных узлов в 4 раза. При этом в 2 раза уменьшается временной шаг модели (для выполнения вычислительной устойчивости по условию Куранта – Фридрихса – Леви), а время счета возрастает в кубической степени при равных прочих условиях. Для исследовательских целей увеличение временных затрат не критично, но для оперативной работы, когда прогноз должен быть просчитан к определенному времени, все эти нюансы надо учитывать и выбирать “оптимальное разрешение”, при котором будет соблюдаться необходимый баланс между возможностью уточнения прогноза и вычислительными затратами.



**Рис. 4.** Выбросы CO (кТ/год) на регулярных сетках с шагом 2 км (а) и 1 км (б).

**Fig. 4.** Emissions of CO (kT/year) on regular grids with a resolution of 2 km (a) and 1 km (б).

Подготовленная для режима автоматизированного использования методика применена для подготовки сеточных данных всех представленных в БД АВА загрязняющих веществ. Визуализация полученных результатов выполнена с применением языка программирования bash, FORTRAN 90 и пакета GrADS. Полученные сеточные данные представлены в виде рисунков, а также файлов, записанных в бесформатном виде. На рис. 5 и 6 приведены примеры некоторых полученных полей эмиссий загрязняющих веществ по г. Москве. Для визуального контроля создаются рисунки эмиссий с числовыми значениями в узлах регулярной сетки (рис. 5).



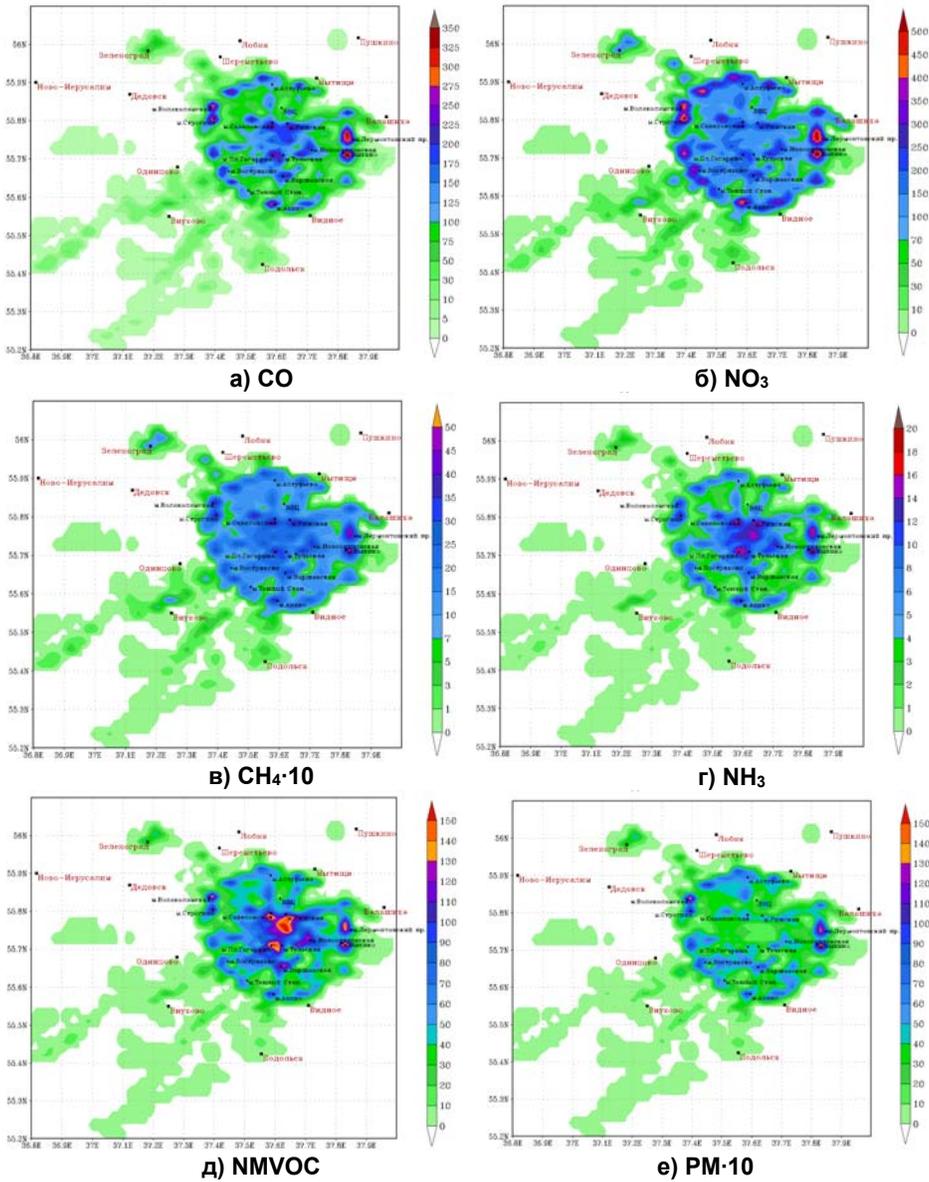
**Рис. 5.** Годовые выбросы CO (кТ/год) в сеточном виде.  
**Fig. 5.** Annual CO emissions (kT / year) in grid form.

**Выводы.** Разработанная методика позволяет преобразовывать данные эмиссий загрязняющих веществ от линейных источников в регулярную сетку с заданным горизонтальным разрешением. Методика автоматизирована, что позволяет использовать ее для разных научных и практических задач. Предполагается усовершенствование методики за счет учета характеристик землепользования, орографии и др. параметров.

**Благодарность.** Выражаю признательность ГПБУ «Мосэкомониторинг», ОАО НИИАТ за предоставленные данные о выбросах загрязняющих веществ и возможность их использования в прогностических моделях.

#### Список литературы

1. Донченко В., Кунин Ю., Рузский А., Виженский В. Методы расчета выбросов от автотранспорта и результаты их применения // Журнал автомобильных инженеров. 2014. № 3. С. 44-51.
2. Agung Setianto, Tamia Triandini. Comparison of kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis // J. SE Asian Appl. Geol. Jan-Jun 2013. Vol. 5(1). P. 21-29.
3. McDonald B.C., McBride Z.C., Martin E.W., Harley R.A. High-resolution mapping of motor vehicle carbon dioxide emissions // J. Geophys. Res. Atmos. Vol. 119. P. 5283-5298. doi:10.1002/2013JD021219.
4. Pérez P., Teresa M., Martínez F., Guevara M., Baldasano J.M. Air quality forecasts at kilometer scale grid over Spanish complex terrains // Geoscientific Model Development. 2014. Vol. 7. P. 1979-1999.
5. Shepard D. A two-dimensional interpolation for irregularly-spaced data // 518 Proceedings – 1968 ACM National Conference. P. 517-524.



**Рис. 6.** Поля загрязняющих веществ (кТ/год), поступающих в атмосферу города от автотранспорта.

**Fig. 6.** Fields of emissions pollutant (kT / year) entering the city's atmosphere from motor transport vehicles.

### References

1. Donchenko V., Kunin J., Ruzsky A., Vizhensky V. Metody rascheta vybrosov ot avtotransporta i rezul'taty ikh primeneniya [Methods for estimating emissions from vehicles and their application]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov* [Zurnal AAI], 2014, no. 3, pp. 44-51 [in Russ.].
2. Agung Setianto, Tamia Triandini. Comparison of kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis. *J. SE Asian Appl. Geol.* Jan-Jun 2013, vol. 5(1), pp. 21-29.
3. McDonald B.C., McBride Z.C., Martin E.W., Harley R.A. High-resolution mapping of motor vehicle carbon dioxide emissions. *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 119, pp. 5283-5298, doi:10.1002/2013JD021219.
4. Pérez P., Teresa M., Martínez F., Guevara M., Baldasano J.M. Air quality forecasts at kilometer scale grid over Spanish complex terrains. *Geoscientific Model Development*, 2014, vol. 7, pp. 1979-1999.
5. Shepard D. A two-dimensional interpolation for irregularly-spaced data. *518 Proceedings – 1968 ACM National Conference*, pp. 517-524.

Поступила в редакцию 22.05.2018 г.

Received by the editor 22.05.2018.