

Проверка применимости закона распределения мелкодисперсной пыли для различных категорий дорог

Ю.П. Иванова¹, Е.О. Брызгина², Т.В. Соловьева¹, А.А. Сахарова¹,
О.О. Иванова¹, М.Д. Азарова¹

*Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного
технического университета¹*

*Академия интеллектуальных транспортных систем в автомобильно-дорожном
комплексе Российского университета транспорта²*

Аннотация: Прогноз загрязнения мелкодисперсной пылью, организация мониторинга и контроля качества воздушной среды актуальны для городов с развитой транспортной инфраструктурой. В статье проводится проверка применения закона распределения для концентрации мелкодисперсной пыли $PM_{2,5}$ и PM_{10} для магистралей городского, районного и местного значения, объём выборки составил 50 значений.

Ключевые слова: линейный город, закон распределения, мелкодисперсная пыль, дороги, смешанное гауссовское распределение.

К одним из наиболее протяженных городов России относится Волгоград, который имеет линейную структуру. Волгоград располагается вдоль реки Волги, протяженностью почти 100 км, с шириной города от 3 до 10 км и общей площадью, очерченной границами в 400 км^2 [1].

Линейный город Волгоград с прилегающими Городищенским, Калачевским, Среднеахтубинским и Светлоярским районами располагается на правом берегу реки Волги, является крупным транспортным узлом, связывающим разные регионы России (ГОСТ Р 52398-2005. Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования. – Москва: Стандартинформ, 2006). Волгоград территориально делится на 8 административных районов, на которых сосредоточены промышленные предприятия (рис.1). Движение транспортных потоков в г. Волгограде преимущественно осуществляется по четырем магистралям, проходящим вдоль р. Волги и расположенным в непосредственной близости к селитебным

территориям, вследствие чего защита атмосферного воздуха от воздействия автотранспорта относится к одной из глобальных проблем [1, 2].

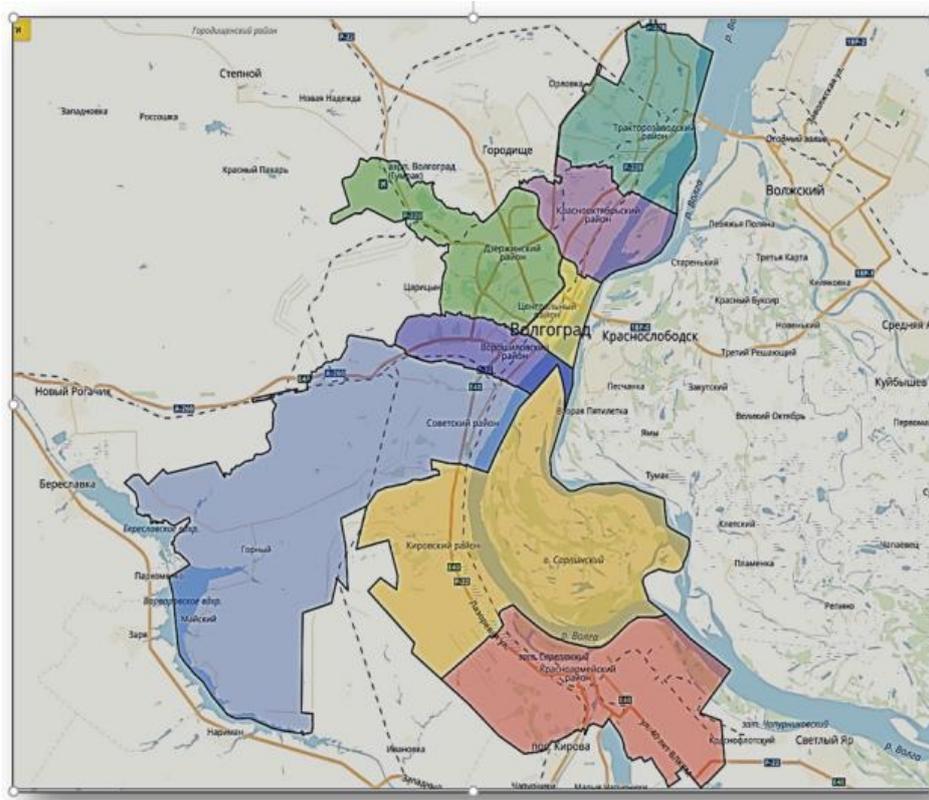


Рис. 1 - Карта г. Волгограда с территориальным делением районов

0 (нулевая) продольная магистраль, проходящая вдоль р. Волги через три района города Волгограда и дублирующая часть проспекта имени В.И. Ленина, проходит от Мамаева Кургана (Центральный район) до ул. Калинина (Ворошиловский район), с преобладающим большинством легкового транспорта.

I продольная магистраль (проспект имени В.И. Ленина и ул. Р.-Крестьянская) проходит через 5 районов линейного города Волгограда, располагающихся вдоль р. Волги от Тракторозаводского района и до Советского, соединяя их между собой. По I продольной магистрали осуществляется движение преимущественно легкового и общественного транспорта.

II продольная магистраль (ул. Еременко, ул. Шурухина, ул. Рокоссовского, ул. Череповецкая, пр. Университетский, ул. 64-ой Армии, ул. Лазоревая), располагается в незначительной удаленности от р. Волги и является связующей между всеми районами г. Волгограда, начиная с Тракторозаводского района включая Красноармейский район. По ней осуществляется движение как легкового, общественного, так и грузового транспорта.

III продольная магистраль в преобладающем большинстве предназначена для движения транзитного транспорта, позволяя обеспечить снижение количества автотранспорта (грузового и легкового) проходящего в черте города [3].

С целью получения информации об экологической ситуации на примагистральных территориях линейного города Волгограда необходимо применение различных методов исследования, позволяющих обеспечить всесторонний подход к решению проблем [4,5].

Измерения, проводимые на примагистральных территориях линейного города Волгограда, позволили выделить участки с наибольшим загрязнением атмосферного воздуха, а также при отсутствии постов наблюдения получить функцию распределения для концентраций мелкодисперсной пыли $PM_{2,5}$ и PM_{10} [6-8].

Проведена проверка применения закона распределения концентрации мелкодисперсной пыли $PM_{2,5}$ и PM_{10} для магистралей городского, районного и местного значения, объём выборки 50 значений соответственно. Проверка закона распределения проводилась по критерию Колмогорова-Смирнова. Лучше всего экспериментальные данные описываются смешанным гауссовским распределением [9]. В таблицах 1 и 2 представлены значения параметров для мелкодисперсной пыли $PM_{2,5}$ и PM_{10} соответственно. В

таблицах 3 и 4 функция плотности смешанного гауссовского распределения для $PM_{2,5}$ и PM_{10} .

Функция плотности смешанного гауссовского распределения имеет вид [10]:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n k_i f_i(x), \quad (1)$$

где k_i — числовые коэффициенты или коэффициенты смеси, а $f_i(x)$ — функции плотности, т.е. функции нормального распределения. Полученные значения параметров записаны в таблице 1.

Таблица 1 - Значения параметров для смешанного гауссовского распределения для PM_{10}

Название параметров	Первая функция плотности	Вторая функция плотности
Дороги городского значения		
Коэффициент смеси	0,58	0,42
Среднее значение в долях ПДК _{м.р.} (0,5 мг/м ³)	0,54	0,60
Стандартное отклонение	0,15	0,02
Дороги районного значения		
Коэффициент смеси	0,16	0,84
Среднее значение в долях ПДК _{м.р.} (0,5 мг/м ³)	0,30	0,63
Стандартное отклонение	0,06	0,10
Дороги местного значения		
Коэффициент смеси	0,078	0,92
Среднее значение в долях ПДК _{м.р.} (0,5 мг/м ³)	0,38	0,58
Стандартное отклонение	0,15	0,101

Функция плотности для $PM_{2,5}$ и PM_{10} :

1. Дороги городского значения:

$$f(PM_{2,5}) = \frac{0,34}{0,014\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{2,5}-0,28)^2}{0,004}} + \frac{0,66}{0,067\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{2,5}-0,24)^2}{0,009}}$$

$$f(PM_{10}) = \frac{0,58}{0,15\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{10}-0,54)^2}{0,045}} + \frac{0,42}{0,02\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{10}-0,60)^2}{0,001}}$$

2. Дороги районного значения:

$$f(PM_{2,5}) = \frac{0,26}{0,06\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{2,5}-0,18)^2}{0,007}} + \frac{0,74}{0,06\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{2,5}-0,30)^2}{0,007}}$$

$$f(PM_{10}) = \frac{0,16}{0,15\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{10}-0,30)^2}{0,007}} + \frac{0,84}{0,10\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{10}-0,63)^2}{0,02}}$$

3. Дороги местного значения:

$$f(PM_{2,5}) = \frac{0,26}{0,06\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{2,5}-0,21)^2}{0,007}} + \frac{0,74}{0,041\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{2,5}-0,30)^2}{0,003}}$$

$$f(PM_{10}) = \frac{0,078}{0,15\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{10}-0,38)^2}{0,045}} + \frac{0,92}{0,101\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{10}-0,58)^2}{0,02}}$$

Таблица 2 - Значения параметров для смешанного гауссовского распределения для $PM_{2,5}$

Название параметров	Первая функция плотности	Вторая функция плотности
Дороги городского значения		
Коэффициент смеси	0,34	0,66
Среднее значение в долях ПДК _{м.р.} (0,5 мг/м ³)	0,28	0,24
Стандартное отклонение	0,014	0,067
Дороги районного значения		
Коэффициент смеси	0,26	0,74
Среднее значение в долях ПДК _{м.р.} (0,5 мг/м ³)	0,18	0,30
Стандартное отклонение	0,06	0,06
Дороги местного значения		
Коэффициент смеси	0,26	0,74

Среднее значение в долях ПДК _{м.р.} (0,5 мг/м ³)	0,21	0,30
Стандартное отклонение	0,06	0,041

Рассчитаем вероятность превышения ПДК мелкодисперсной пыли для различных категорий дорог.

Концентрацию мелкодисперсной пыли можно рассматривать, как случайную величину, имеющую смешанный гауссовский закон. Определим вероятность того, что концентрация мелкодисперсной пыли превышает ПДК, которое для $PM_{2,5}$ равно 0,16 мг/м³, а для PM_{10} — 0,3 мг/м³, для различных категорий дорог. Для вычисления вероятностей будем использовать формулу:

$$P(Y_0 > a) = 1 - P(Y_0 \leq a) = 1 - (P(Y_0 < a) + P(Y_0 = a)) = 1 - P(Y_0 < a) = 1 - F(a), \quad (2)$$

$P(Y_0 = a) = 0$, так как вероятность того, что непрерывная случайная величина примет ровно одно значение, равна нулю, а вероятность $P(Y_0 < a) = F(a)$ есть функция распределения данной случайной величины в указанной точке. В нашем случае, $a = 0,16$ и $a = 0,3$.

Функция распределения для нормального закона имеет вид:

$$F(Y_0) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{Y_0 - Y_{cp}}{\sigma}\right), \quad (3)$$

где Y_{cp} — среднее значение случайной величины, σ — среднее квадратическое отклонение, а $\Phi(Y_0)$ — интегральная функция Лапласа

$$\Phi(Y_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{Y_0} e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (4)$$

Дороги городского значения. Были получены функция плотностей:

$$f(PM_{10}) = \frac{0,58}{0,15\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{10}-0,54)^2}{0,045}} + \frac{0,42}{0,02\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{10}-0,60)^2}{0,001}}$$

$$F\left(\frac{0,3}{\text{ПДК}}\right) = 0,58(0,5 + \Phi(0,4)) + 0,42(0,5 + \Phi(0)) = 0,59.$$

Тогда искомая вероятность будет равна: $P(PM_{10} > 0,6) = 1 - 0,59 = 0,41$, т.е. для дорог городского значения концентрация мелкодисперсной пыли PM_{10} превышает ПДК₁₀, равное 0,3 мг/м³ с вероятностью 41%.

$$f(PM_{2,5}) = \frac{0,34}{0,014\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{2,5}-0,28)^2}{0,004}} + \frac{0,66}{0,067\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{2,5}-0,24)^2}{0,009}}$$

$$F\left(\frac{0,16}{\text{ПДК}}\right) = 0,34(0,5 + \Phi(2,86)) + 0,66(0,5 + \Phi(1,19)) = 0,92.$$

Тогда искомая вероятность будет равна: $P(PM_{2,5} > 0,32) = 1 - 0,92 = 0,08$, т.е. для дорог городского значения концентрация мелкодисперсной пыли $PM_{2,5}$ превышает ПДК_{2,5}, равное 0,16 мг/м³ с вероятностью 8%.

Дороги районного значения. Функции плотности для этого случая имеют вид:

$$f(PM_{10}) = \frac{0,16}{0,15\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{10}-0,30)^2}{0,007}} + \frac{0,84}{0,10\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{10}-0,63)^2}{0,02}}$$

$$F\left(\frac{0,3}{\text{ПДК}}\right) = 0,16(0,5 + \Phi(2)) + 0,84(0,5 - \Phi(0,3)) = 0,48.$$

Тогда искомая вероятность будет равна: $P(PM_{10} > 0,6) = 1 - 0,48 = 0,52$, т.е. для дорог районного значения концентрация мелкодисперсной пыли PM_{10} превышает ПДК₁₀, равное 0,3 мг/м³ с вероятностью 52%.

$$f(PM_{2,5}) = \frac{0,26}{0,06\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{2,5}-0,18)^2}{0,007}} + \frac{0,74}{0,06\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{2,5}-0,30)^2}{0,007}}$$

$$F\left(\frac{0,16}{\text{ПДК}}\right) = 0,26(0,5 + \Phi(2,33)) + 0,74(0,5 + \Phi(0,33)) = 0,723.$$

Тогда искомая вероятность будет равна: $P(PM_{2,5} > 0,32) = 1 - 0,723 = 0,277$, т.е. для дорог районного значения концентрация мелкодисперсной пыли $PM_{2,5}$ превышает ПДК_{2,5}, равное $0,16 \text{ мг/м}^3$ с вероятностью 27,7%.

Дороги местного значения. Функции плотностей для этого случая имеют вид:

$$f(PM_{10}) = \frac{0,078}{0,15\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{10}-0,38)^2}{0,045}} + \frac{0,92}{0,101\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{10}-0,58)^2}{0,02}}$$

$$F\left(\frac{0,3}{\text{ПДК}}\right) = 0,078(0,5 + \Phi(1,47)) + 0,92(0,5 + \Phi(0,20)) = 0,605.$$

Тогда искомая вероятность будет равна: $P(PM_{10} > 0,6) = 1 - 0,605 = 0,395$, т.е. для дорог местного значения концентрация мелкодисперсной пыли PM_{10} превышает ПДК₁₀, равное $0,3 \text{ мг/м}^3$ с вероятностью 39,5%.

$$f(PM_{2,5}) = \frac{0,26}{0,06\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{2,5}-0,21)^2}{0,007}} + \frac{0,74}{0,041\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(PM_{2,5}-0,30)^2}{0,003}}$$

$$F\left(\frac{0,16}{\text{ПДК}}\right) = 0,26(0,5 + \Phi(1,83)) + 0,74(0,5 + \Phi(0,5)) = 0,763.$$

Тогда искомая вероятность будет равна: $P(PM_{2,5} > 0,32) = 1 - 0,763 = 0,237$, т.е. для дорог местного значения концентрация мелкодисперсной пыли $PM_{2,5}$ превышает ПДК_{2,5}, равное $0,16 \text{ мг/м}^3$ с вероятностью 23,7%.

Таким образом, показано, что вероятность превышения ПДК концентрации мелкодисперсной пыли $PM_{2,5}$ для дорог городского типа составляет 8%, районного значения - 27,7% и местного значения - 23,7%. А вероятность превышения ПДК PM_{10} для дорог городского типа составляет 41%, районного значения - 52% и местного значения - 39,5%.

Проведенные натурные исследования показали, что функция распределения $PM_{2,5}$ и PM_{10} описывается смешанным гауссовским распределением для каждого из трех типов дорог.

Литература

1. Антюфеев А.В., Птичникова Г. А. Линейный город. Градостроительная система «Большой Волгоград». – Волгоград: ВолгГТУ, 2018. — 197 с.
 2. Ганжа О.А., Иванова Ю.П. Оценка факторов антропогенного воздействия на экологическое состояние урбанизированных территорий. Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. - 2012. - Вып. 27 (46). - С. 187-189. - Библиогр.: с. 189 (2 назв.).
 3. Иванова Ю. П. Повышение экологической безопасности линейного города при уменьшении воздействия оксида углерода и шума (на примере г. Волгограда). Дис. канд. тех. наук. 05.23.19. Волгоградский тех. университет, Волгоград, 2021. URL: vstu.ru/upload/iblock/49f/49f245001de9cf1a9b54cb5544af5e3f.pdf.
 4. Аксенов И.Я., Аксенов В.И. Транспорт и охрана окружающей среды. М.: Транспорт, 2012, 175 с.
 5. Шеина С.Г., Гиря Л.В. Совершенствование методов организационно-технологического проектирования при реконструкции городской застройки с учетом экологических факторов // Инженерный вестник Дона, 2011, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/703.
 6. Vlasov, D.; Ramírez, O.; Luhar, A. Road Dust in Urban and Industrial Environments: Sources, Pollutants, Impacts, and Management. Atmosphere 2022, 13, 607 URL: doi.org/10.3390/atmos13040607.
 7. Semerjian, L.; Okaiyeto, K.; Ojemaye, M.O.; Ekundayo, T.C.; Igwaran, A.; Okoh A.I. Global Systematic Mapping of Road Dust Research From 1906 to 2020: Research Gaps and Future Direction. Sustainability 2021, 13, 11516. URL: doi.org/10.3390/su132011516.
 8. Донченко В.В., Чижова В.С., Недре А.Ю., Азаров В.Н. Организация экологического контроля на автомобильном транспорте на основе
-

использования средств дистанционного зондирования выбросов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 3(88). С. 241-254. URL: elibrary.ru/item.asp?id=49331324.

9. Гмурман В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика / М.: Высш. шк., 2007 г. – 456 с.

10. Азаров В.Н., Иванова Ю.П., Шаповалова Ю.А., Иванова О.О. Осуществление проверки закона распределения концентрации оксида углерода на бордюре проезжей части дорог разной категории // Инженерный вестник Дона. - 2020. - № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2020/6413.

References

1. Antyufeev A. V., Ptichnikova G. A. Linejny`j gorod. Gradostroitel`naya sistema "Bol`shoj Volgograd" [Linear city. Urban planning system "Big Volgograd"]. Volgograd: VolgGTU, 2018. 197 p.

2. Ganzha O. A., Ivanova Yu. P. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturostroitel`nogo universiteta. Ser.: Stroitel`stvo i arxitektura. 2012. Vy`p. 27 (46). S. 187-189. Bibliogr.: p. 189 (2 nazv.).

3. Ivanova Yu. P. Povy`shenie e`kologicheskoy bezopasnosti linejnogo goroda pri umen`shenii vozdejstviya oksida ugleroda i shuma (na primere g. Volgograda). Dis. kand. tex. nauk. 05.23.19. Volgogradskij tex. universitet, Volgograd, 2021. URL: vstu.ru/upload/iblock/49f/49f245001de9cf1a9b54cb5544af5e3f.pdf.

4. Aksenov I.Ya., Aksenov V.I. Transport i ohrana okruzhayushhej sredy` [Transport and environmental protection]. M.: Transport, 2012, 175 p.

5. Sheina S.G., Girya L.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2011, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/703.

6. Vlasov, D.; Ramírez, O.; Luhar, A. Road Dust in Urban and Industrial Environments: Sources, Pollutants, Impacts, and Management. Atmosphere 2022, 13, 607 URL: doi.org/10.3390/atmos13040607.



7. Semerjian, L.; Okaiyeto, K.; Ojemaye, M.O.; Ekundayo, T.C.; Igwaran, A.; Okoh A.I. Global Systematic Mapping of Road Dust Research From 1906 to 2020: Research Gaps and Future Direction. Sustainability 2021, 13, 11516. URL: doi.org/10.3390/su132011516.

8. Donchenko V.V., Chizhova V.S., Nedre A.Yu., Azarov V.N. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2022. № 3(88). P. 241-254. URL: elibrary.ru/item.asp?id=49331324.

9. Gmurman V.B. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. M. Vysshshk, 2007 g. 456 p.

10. Azarov V.N., Ivanova Yu.P., Shapovalova Yu.A., Ivanova O.O. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2020/6413.