

УДК 656

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.43.4.036](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.036)

## Математическая модель оценки вероятности пересечения улицы пешеходами в некотором случайном месте

М.А. Арутюнян✉

*Государственный университет морского и речного флота имени адмирала  
С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация*

**Резюме.** В настоящей статье представлен один из полученных автором научных результатов в ходе проводимого диссертационного исследования. Раскрыта проблема формирования удобной и безопасной пешеходной инфраструктуры, что является одним из актуальных вопросов развития современного города. Проведен анализ российского и зарубежного опыта организации пешеходной инфраструктуры. Выявлено, что в российском опыте организации эффективной и безопасной пешеходной инфраструктуры часто наблюдаются проблемы, встречающиеся в кварталах с любыми типами застройки, в том числе такие как отсутствие или нерационально расположенные технические средства организации дорожного движения. Разработана математическая модель, которая дает возможность оценивать вероятность пересечения улицы пешеходами в том или ином месте на всей протяженности. Определены параметры предлагаемой модели. Предложено также применить результаты исследований поведения людей в ситуациях, в которых работают сходные или те же психоэмоциональные мотиваторы, побуждающие к пересечению улицы в том или ином месте, а также использовать зависимости, которые очевидно коррелируют с необходимыми для проведения данного исследования статистическими зависимостями. Полученные результаты предложено использовать в последующих работах при разработке имитационной модели управления дорожным движением, позволяющей производить оценку загруженности улично-дорожной сети и последующую оптимизацию транспортных и пешеходных потоков с целью обеспечения требуемой безопасности дорожного движения.

**Ключевые слова:** модель, параметры, транспортные и пешеходные потоки, вероятность, улично-дорожная сеть, дорожно-транспортное происшествие, безопасность дорожного движения.

**Для цитирования:** Арутюнян М.А. Математическая модель оценки вероятности пересечения улицы пешеходами в некотором случайном месте. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1481> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.036

## Mathematical model for estimating the probability of pedestrians crossing a street at some random location

М.А. Arutiunian✉

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg,  
the Russian Federation*

**Abstract.** This article presents one of the scientific results obtained by the author during the dissertation study. The problem of forming a convenient and safe pedestrian infrastructure, which is one of the urgent issues of the development of a modern city, is revealed. An analysis of Russian and foreign experience in organizing pedestrian infrastructure was carried out. It was revealed that in the Russian experience of organizing effective and safe pedestrian infrastructure, problems are often observed that occur in neighborhoods with any types of development, including such as the absence or irrational location of technical means of organizing traffic. A mathematical model has been developed that makes it possible to assess the probability of a pedestrian crossing a street in a particular place along the entire length. The parameters of the proposed model are defined. It is also proposed to apply the results of studies of human

behavior in situations in which similar or the same psychoemotional motivators work, prompting the intersection of the street in a particular place, as well as to use dependencies that obviously correlate with the statistical dependencies necessary for conducting this study. The obtained results are proposed to be used in subsequent works in the development of a simulated model of traffic management, which allows assessing the congestion of the road network and subsequent optimization of transport and pedestrian flows in order to ensure the required road safety.

**Keywords:** model, parameters, traffic and pedestrian flows, probability, road network, road accident, road safety.

**For citation:** Arutiunian M.A Mathematical model for estimating the probability of pedestrians crossing a street at some random location. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1481> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.036 (In Russ.).

## Введение

Формирование удобной и безопасной пешеходной инфраструктуры является одним из актуальных вопросов развития современного города. При организации городской среды именно пешеход является приоритетом. Развитие пешеходной инфраструктуры и пешеходных зон также является неотъемлемой частью так называемой умной мобильности, которая входит в концепцию умного города [1].

В зарубежном опыте создания современных городов, стремящихся к концепции умного города, можно встретить тенденцию организации среды, направленную в первую очередь на повышение удобства для пешеходов. Такие города описаны в книге «Smart cities atlas», к которым относятся, например Болонья, Турин [1]. Отдельно можно выделить Стокгольм, в котором был принят план развития под названием «The Walkable City» [2], в рамках которого предполагается развивать связи, объединяющие разные районы города, создавать больше парков и зеленых зон, улучшать транспортные линии. Таким образом, уже к 2017 году 90 % населения города жило не более чем в 300 метрах от зеленых зон.

Книга «Cities Alive. Towards a walking world» [3] целиком посвящена доказательству того, что развитие пешеходной среды должно быть доминирующим в современных городских условиях. В ней приводится 50 достоинств, достижимых путем создания удобных для пешеходов условий, среди них потенциальные улучшения здоровья населения по разным показателям, повышение общей безопасности, стимул к развитию уличного искусства и культуры. Также в книге приведен ряд реальных городских проектов, реализуемых для пешеходов: освобождение центра Парижа от транспорта по воскресеньям, план локальной связности разных точек притяжения в пределах двадцати минут ходьбы в Мельбурне, превращение 90 % города в пешеходные зоны в Понтеведре и так далее.

В российском опыте организации эффективной и безопасной пешеходной инфраструктуры часто наблюдаются проблемы, встречающиеся в кварталах с любыми типами застройки. Особое внимание можно уделить недостаточному количеству технических средств организации дорожного движения, в частности пешеходных переходов или их неэффективному расположению.

Отдельным важным моментом выступает безопасность пешеходов, в частности создание возможности для безопасного пересечения автомобильных дорог.

Основываясь на статистике государственной инспекции безопасности дорожного движения (ГИБДД), можно сказать, что в России большая часть наездов на пешеходов совершается вне пешеходных переходов. Так, в 2015 году из всех ДТП (184 000 случаев) 31 % составлял наезд на пешехода (56 886 случаев), из них только 35 % на пешеходном переходе (19 779). В 2016 году наезд на пешехода (52 001 случай) составлял 30 % от всех

ДТП (173 694 случаев), из них 36 % на переходе (18 498). Для 2017 года зафиксировано 169 432 случая ДТП, 51 839 случаев наезда на пешехода – 31 % от всех ДТП, и 38 % из них произошли на пешеходном переходе (19 591). Для 2018 года зафиксировано 168 099 случая ДТП, из них 48 814 случаев наезда на пешехода (29 % от всех ДТП), причем на пешеходных переходах – 39 % (18 844) [4].

В настоящее время с ростом транспортных потоков необходимо осуществлять опережающее прогнозирование различных ситуаций, в результате которых могут произойти дорожно-транспортные происшествия (ДТП) не только в местах размещения технических средств организации дорожного движения, в частности пешеходных переходов, но и вне их. В этом смысле разработка новых подходов и моделей, дающих возможность автоматизированно анализировать дорожно-транспортную ситуацию на всем протяжении улиц, является достаточно актуальной [5-8].

С учетом вышеупомянутого предлагается построить модель, позволяющую оценивать вероятность пересечения улицы участниками дорожного движения, в частности пешеходами, в том или ином месте на всей протяженности улицы.

### **Материалы и методы**

Теоретическую и методологическую основу исследования составляют нормативно-правовые базы, традиционные и современные научные труды ведущих российских и иностранных научных работников в области транспорта, моделирования транспортных и пешеходных потоков, организации дорожного движения.

В качестве методов предполагаемого исследования выступают: общенаучные методы, статистические способы сбора и обработки информации, индуктивный и дедуктивный методы, сравнительный и статистический анализ.

В данной работе осуществляется разработка модели, дающей возможность оценить вероятность пересечения улицы по всей протяженности. В ходе исследования рассматриваются только дороги II-IV категории, поскольку вычисление вероятностей пересечения пешеходами дорог типа IA, IB, IB не представляет большого интереса. Данные вероятности практически равны нулю – на автомагистралях и большинстве скоростных дорог не предусматривают при их строительстве пешеходных зон, а все пешеходные переходы на данных типах дорог располагаются либо под землей, либо над дорогами. Также не будут рассматриваться вопросы, связанные с пересечением дорог в местах пешеходных переходов, поскольку эти вопросы освещены подробно в большом количестве научных работ, выкладки из ряда которых приведены в самом диссертационном исследовании автора, частью которого является данная статья.

В ходе проведенного анализа установлено, что не проводилось сколько-нибудь значительных статистических исследований по непосредственному изучению поведения человека при пересечении улицы в неполюженном месте, психоэмоциональных мотиваторов совершения таких действий для установления базовых вероятностей пересечения улицы в неполюженном месте по тем или иным причинам или в зависимости от тех или иных параметров улично-дорожной сети. В связи с чем предлагается применить результаты исследования поведения людей в ситуациях, в которых работают сходные или те же психоэмоциональные мотиваторы, а также использовать зависимости, которые очевидно коррелируют с необходимыми нам статистическими зависимостями. Также стоит отметить, что анализируется ситуация на протяженности улицы, не принимая во внимание расположение припаркованного автотранспорта, которое постоянно меняется.

## Результаты

В ходе проведенного анализа причин, побуждающих человека пересечь дорогу в неполюженном месте, а также изучения параметров улично-дорожной сети (УДС), влияющих на вероятность совершения такого действия, определены параметры, на основе которых будет разрабатываться модель, позволяющая оценить вероятность пересечения улицы пешеходами в некотором случайном месте. Определены следующие параметры:

- 1) среднее количество пешеходов на исследуемом участке;
- 2) интенсивность движения транспортных средств на проезжей части;
- 3) ширина проезжей части;
- 4) наличие ограждений на дороге или по обочинам;
- 5) расстояние до точек притяжения в районе оцениваемого участка дороги по протяженности ее длины;
- 6) расположение выходов из подъездов либо расположение арок/проездов на дворовые территории;
- 7) расстояние до пешеходного перехода.

Параметр среднее количество пешеходов на исследуемом участке. Ситуации плотного пешеходного потока возникают в случае плотности потока пешеходного движения категории D и выше [9, 10]. Данные для анализа вероятностей собираются посредством натуральных наблюдений, а также опроса и оформляются в виде Таблицы 1.

Таблица 1 – Вариант группировки данных о вероятности перехода проезжей части в зависимости от категории плотности пешеходного движения

Table 1 – Option of grouping data on the probability of a roadway crossing depending on the category of pedestrian traffic density

р, вероятность перехода проезжей части, %	р <sub>1</sub>	р <sub>2</sub>	р <sub>3</sub>	р <sub>4</sub>	р <sub>5</sub>	р <sub>6</sub>
Категория плотности пешеходного движения, чел/м <sup>2</sup>	A	B	C	D	E	F
	≤0,08	≤ 0,25	≤0,40	≤0,70	≤ 1,80	> 1,80

*Параметр «интенсивность движения транспортных средств на проезжей части».* Для расчета используется статистика ДТП с пешеходами. Выдвигается гипотеза о том, что количество происходящих ДТП с пешеходами соотносится с интенсивностью движения транспорта по определенной зависимости не только по причине того, что транспортный поток определенной интенсивности создает большую угрозу возникновения ДТП, но и по причине того, что при транспортном потоке определенной интенсивности пешеход с большей вероятностью по психоэмоциональным причинам решается на переход дороги в неполюженном месте и, соответственно, сама ситуация возникает с большей вероятностью, в которой пешеход может попасть в ДТП. На основе этого делается вывод о том, что зависимость количества ДТП с пешеходами от интенсивности потока движения транспортных средств коррелирует с зависимостью количества переходящих в неполюженном месте пешеходов от интенсивности потока движения транспортных средств, и, соответственно, оценив зависимость количества ДТП от интенсивности движения и взяв в среднем ту часть из этой совокупности, которая относится к ДТП с пешеходами, получится необходимое значение. Зависимость количества ДТП от интенсивности дорожного движения представлена на Рисунке 1.

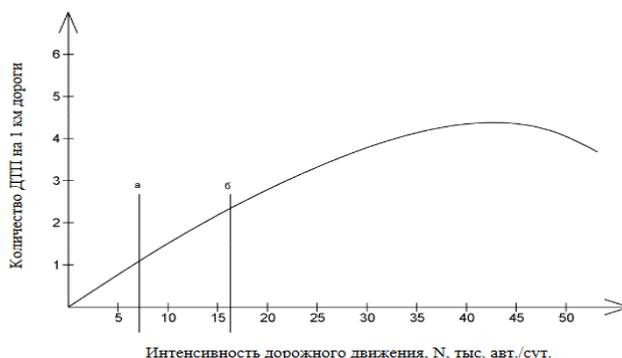


Рисунок 1 – Зависимость количества ДТП от интенсивности движения

Figure 1 – Dependence of the number of accidents on traffic intensity

График, приведенный на Рисунке 1, показывает изменения количества ДТП с пострадавшими и погибшими в зависимости от интенсивности движения на автомобильных дорогах, где а – появление участков концентрации ДТП, б – появление связанных участков концентрации ДТП. Показатели аварийности изменяются в линейной зависимости от роста интенсивности на дороге. Однако уже при приведенной интенсивности движения, равной 35 тыс. авт./сут., кривая выходит на «плато», а при интенсивности, составляющей 45 тыс. авт./сут. и более, снижается. Это объясняется тем, что при плотном транспортном потоке скорости движения резко падают, а количество выполняемых обгонов и перестроений сокращается, вследствие чего количество ДТП с пострадавшими и число погибших значительно уменьшается.

Взяв в расчет среднее количество пешеходов, движущихся по улицам города в день на 1 км тротуара, и, соответственно, разделив полученное оценочное значение количества пешеходов, пересекающих проезжую часть, на общее количество пешеходов, получится вероятность пересечения дороги в неполюженном месте пешеходом в зависимости от интенсивности движения транспорта.

Ширина проезжей части. При формировании оценки приводится средняя статистика по ДТП по следующим типам дорог:

- дороги III категории без разделительной полосы с двумя полосами для движения в одном направлении.
- дороги III категории с одной полосой для движения в одном направлении.
- дороги IV категории.

Предполагая, что данные значения коррелируют с количеством переходящих дорогу в неполюженном месте, получается необходимое статистическое распределение. На этапе определения оценочного значения количества пешеходов, переходящих проезжую часть в зависимости от интенсивности движения транспорта, соответствующее значение умножается на получаемое отклонение  $k$  в зависимости от типа и ширины дороги:

$$k = P_{ртд} / \left( \frac{P_{дорII} + P_{дорIIIкc2п} + P_{дорIIIкc1п} + P_{дорIV}}{4} \right), \quad (1)$$

где

$P_{ртд}$  – вероятность рассматриваемого типа дороги;

$P_{дорII}$  – вероятность дороги II категории с конструктивной разделительной полосой;  $P_{дорIIIкc2п}$  – вероятность дороги III категории без разделительной полосы с двумя полосами для движения в одном направлении;

$P_{дорIIIкc1п}$  – вероятность дороги III категории с одной полосой для движения в одном направлении;

$P_{дорIV}$  – вероятность дороги IV категории.

Наличие ограждений на дороге или по обочинам. Очевидно наличие ограждений на обочине дороги или на разделительной полосе мешает пересечению дороги в неполюженном месте. По этой причине, полная вероятность пересечения дороги в месте расположения ограждений, принимается равной 0,001.

Расстояние до точек притяжения в районе оцениваемого участка дороги по протяженности ее длины. Переход дороги в неполюженном месте обычно вызван необходимостью кратчайшим путем попасть на противоположный участок улицы в необходимую точку. Рассчитывается на основе результатов статистических исследований, сколько человек готово рисковать в процессе достижения результата. Также необходимо учесть статистику среднего количества посетителей каждой точки притяжения. Для определения вероятности пересечения улицы по направлению к той или иной точке притяжения полученное значение делится на значение пешеходного потока на соответствующем участке тротуара.

Также, по всей вероятности, есть некоторый участок пешеходной дороги, на котором люди, направляющиеся к точкам притяжения, будут пересекать в неполюженном месте. Примем данный участок, равным 5 м, а по бокам от этого участка вероятность будет спадать по нормальному распределению:

$$p = e^{\frac{-(x-x_{cp})^2}{2\sigma^2}} / (\sigma\sqrt{2\pi}). \quad (2)$$

*Расположение выходов из подъездов либо расположение арок/проездов на дворовые территории.* Части людей, выходящих из подъездов или арок/проездов с дворовых территорий, требуется немедленно попасть на другую сторону дороги. При расчетах используются статистика готовности людей к риску ради достижения определенной цели, численность жильцов каждого подъезда. Предлагается произвести оценку среднего значения количества человек, проживающих в среднестатистической квартире. После чего на этапе подсчета вероятностей пересечения конкретной улицы, то есть уже на этапе апробации работы с потоками пешеходов конкретной улицы, будут сопоставлены потенциальное количество пересекающих данную улицу в местах размещения подъездов и арок/проездов с потоками пешеходов и, соответственно, получены необходимые выкладки по изменениям вероятностей пересечения улицы в местах размещения подъездов и арок/проездов.

*Расстояние до пешеходного перехода.* Принято, что за 40 м до пешеходного перехода человек начинает рассматривать факт нахождения пешеходного перехода неподалеку, что вносит поправку в общую вероятность пересечения дороги в данном месте. Принято, что зависимость вероятности пересечения дороги от расстояния до пешеходного перехода распределена по нормальному закону и вероятность пересечения дороги будет постепенно расти при приближении к пешеходному переходу и у пешеходного перехода примет значение равное 0,9 от общей вероятности пересечения дороги.

Получив все необходимые статистические выкладки с учетом выявленных параметров производится расчет вероятности пересечения пешеходами дороги в некотором случайном месте по всей протяженности улицы ( $P_x$ ) (формулы 3-6).

При условии наличия ограждения на обочине или на разделительной полосе

$$P_x = P_4, \quad (3)$$

где  $P_4$  – вероятность параметра 4.

При условии отсутствия ограждений на обочине или на разделительной полосе и расстояния до пешеходного перехода больше 40 м

$$P_x = (P_1 + P_5 + P_6) - P_{23}, \quad (4)$$

где

$P_1, P_5, P_6$  – соответствующие вероятности параметров 1,5 и 6;  
 $P_{23}$  – вероятность параметра 2,3

$$P_{23} = k * N_{пп} / N_{ср.инт.пп}, \quad (5)$$

где

$k$  – поправочный коэффициент в зависимости от типа и ширины дороги;  
 $N_{пп}$  – количество переходящих пешеходов при определенной интенсивности транспорта;

$N_{ср.инт.пп}$  – средняя интенсивность пешеходного потока на улице.

При условии отсутствия ограждений на обочине или на разделительной полосе и расстояния до пешеходного перехода меньше 40 м

$$P_x = (P_7 * (P_1 + P_5 + P_6)) - P_{23}, \quad (6)$$

где  $P_7$  – вероятность параметра 7.

Таким образом, разработана модель оценки вероятности пересечения улицы пешеходами в некотором случайном месте по всей протяженности улицы на основе теории вероятностей и математической статистики.

### Заключение

Итак, в данной работе освещена проблема формирования удобной и безопасной пешеходной инфраструктуры, что является одним из актуальных вопросов развития современного города. Разработана математическая модель, позволяющая оценивать вероятность пересечения улицы пешеходами в том или ином месте на всей протяженности.

Полученные результаты предлагается использовать в последующих исследованиях при разработке имитационной модели системы управления дорожным движением, позволяющей производить оценку загруженности улично-дорожной сети и последующую оптимизацию транспортных и пешеходных потоков с целью обеспечения требуемой безопасности дорожного движения.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sanseverino E.R., Vaccaro V. Smart Cities Atlas. Western and Eastern Intelligent Communities. *Springer*, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-47361-1.
2. The Walkable City Stockholm City Plan. *The City Planning Administration*, 2010.
3. *Cities Alive. Towards a walking world*. ARUP, 2016.
4. *Официальный сайт Госавтоинспекции*. Показатели состояния безопасности дорожного движения. URL: <http://stat.gibdd.ru>.
5. Арутюнян М.А. Разработка алгоритмического аппарата по обеспечению безопасности дорожного движения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(3). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1411>. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.013.
6. Arutiunian M.A., Kolesnichenko S.V., Shilkina I.D., Zemskov A.V. Justification of the ways to improve road safety using intelligent transport systems. *AIP Conference Proceedings* 2700, 060002 (2023). DOI: 10.1063/5.0125254.
7. Wang L., Ye S., Cheong K.H., Xie N. Pedestrian group-crossing behavior modeling and simulation based on multidimensional dirty faces game. *Complexity*. 2017.

8. Daganzo C.F., Knoop V.L. Traffic flow on pedestrianized streets. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2016;86:211–222.
9. Чикалина С.Л., Левашев А.Г. Оценка комфортности условий движения пешеходов [Электронный ресурс]. URL: [http://transport.istu.edu/downloads/pedes\\_1.pdf](http://transport.istu.edu/downloads/pedes_1.pdf).
10. Галышев А.Б. Оценка качества условий движения пешеходов по тротуарам. *International Journal of Advanced Studies*. 11(3)83–88. DOI: 10.12731/2227-930X-2021-11-3-83-88.

## REFERENCES

1. Sanseverino E.R., Vaccaro V. Smart Cities Atlas. Western and Eastern Intelligent Communities. *Springer*, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-47361-1.
2. The Walkable City Stockholm City Plan. *The City Planning Administration*, 2010.
3. *Cities Alive. Towards a walking world*. ARUP, 2016.
4. *Oficial'nyj sayt Gosavtoinspekcii*. Pokazateli sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya. URL: <http://stat.gibdd.ru> (In Russ.).
5. Arutiunian M.A. Development of an algorithmic apparatus for ensuring road safety. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1411>. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.013 (In Russ.).
6. Arutiunian M.A., Kolesnichenko S.V., Shilkina I.D., Zemskov A.V. Justification of the ways to improve road safety using intelligent transport systems. *AIP Conference Proceedings* 2700, 060002 (2023). DOI: 10.1063/5.0125254.
7. Wang L., Ye S., Cheong K.H., Xie N. Pedestrian group-crossing behavior modeling and simulation based on multidimensional dirty faces game. *Complexity*. 2017.
8. Daganzo C.F., Knoop V.L. Traffic flow on pedestrianized streets. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2016;86:211–222.
9. Chikalina S.L., Levashev A.G. Ocenka komfortnosti uslovij dvizheniya peshexodov. URL: [http://transport.istu.edu/downloads/pedes\\_1.pdf](http://transport.istu.edu/downloads/pedes_1.pdf). (In Russ.).
10. Galyshev A.B. Assessment of the quality of pedestrian traffic conditions on sidewalks / *International Journal of Advanced Studies*, 11(3)83–88. DOI: 10.12731/2227-930X-2021-11-3-83-88. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Арутюнян Мелания Андраниковна, Melania A. Arutiunian**, Postgraduate Student, аспирант, ассистент кафедры Assistant Lecturer at the Department of математического моделирования и Mathematical Modeling and Applied прикладной информатики, Государственный Informatics, Admiral Makarov State University университет морского и речного флота имени of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, the Russian Federation. Российская Федерация.  
e-mail: [melanya.arutyunyan@yandex.ru](mailto:melanya.arutyunyan@yandex.ru)  
ORCID: [0000-0001-7395-9069](https://orcid.org/0000-0001-7395-9069)

*Статья поступила в редакцию 27.11.2023; одобрена после рецензирования 21.12.2023; принята к публикации 29.12.2023.*

*The article was submitted 27.11.2023; approved after reviewing 21.12.2023; accepted for publication 29.12.2023.*