

УДК 004

## Поиск оптимального маршрута с учетом загрязнения окружающей среды (воздуха)

Статья посвящена программной реализации задачи поиска оптимального маршрута в системе мониторинга загрязнения воздуха, которая используется в составе информационной системы (ИС) и предназначена для информирования пользователей о загрязненности воздуха в городе. По заданным начальной и конечной точкам маршрута и данным о загрязненности воздуха, поступающим с датчиков, система рассчитывает оптимальный маршрут. Рассматриваются алгоритм и реализованное решение задачи поиска оптимального пути. Приведено описание алгоритма поиска.



**О.П. РЯБИЧИНА,**  
старший преподаватель  
кафедры программного  
обеспечения сетей  
телекоммуникаций,  
магистр техники и технологии

УО «Белорусская государственная академия связи»

### **Ключевые слова:**

*загрязненность воздуха, информационная система, алгоритм поиска оптимального маршрута, алгоритм Дейкстры.*

**Введение.** Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно в мире около 3 млн смертей в год связаны с загрязнением атмосферного воздуха. Глобальное загрязнение воздуха сокращает продолжительность жизни человека в среднем на один год. По статистике, среди городских жителей в два раза больше аллергиков, чем среди тех, кто проживает в небольших населенных пунктах. Загрязнение атмосферного воздуха существенно увеличивает риск заболеваний дыхательных путей и сердечно-сосудистой системы как в длительной, так и в краткосрочной перспективе, негативным образом влияет на иммунитет, является канцерогенным фактором [1].

Особенно актуальна эта проблема для городов, в которых расположено большое количество предприятий тяжелой и легкой промышленности, химические производства, коммунальные предприятия, ТЭЦ и другие объекты, характеризующиеся высоким уровнем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Выхлопные газы автомобилей и другого транспорта также составляют существенную часть от общего загрязнения воздуха.

В связи с этим во всем мире сегодня актуальны разработка и реализация ИС, которые помогают

пользователям избегать влияния загрязняющих веществ на организм, извещая их о местах наибольшей опасности и выстраивая обходной маршрут.

**Основная часть.** ИС поиска оптимального маршрута из точки А в точку Б с учетом загрязненности воздуха разрабатывается на основе алгоритма поиска оптимального маршрута, визуализируется и отображается на сайте в интернете.

Решением задачи является программная реализация алгоритма поиска оптимального пути между двумя контрольными точками. Для своей работы ИС использует данные, поступающие со стационарных постов непрерывного контроля загрязнения атмосферы (датчиков) и с мобильных постов (беспилотных летательных аппаратов (БЛА), снабженных станциями измерений содержания загрязняющих веществ в воздухе), информация от которых поступает в интернет в режиме реального времени [2]. Для решения задачи в базе данных предварительно формируется массив исходных данных – начальные и конечные точки пути, уровень загрязненности и т. д. Объектом, для которого выбираются оптимальные маршруты, в данной работе выступает город Минск. На карту города накладывается координатная сетка,



и ее узлы становятся вершинами графа, в котором осуществляется поиск. Главными составляющими являются контрольные точки пути и датчики, установленные на перекрестках в городе. Каждая точка хранит информацию о связанных узлах, т. е. о тех точках, в которые из нее можно перейти. Точка характеризуется координатами  $x$  и  $y$  (широта и долгота соответственно) в градусах с точностью до миллионных долей, что позволяет позиционировать точки с точностью до метра. Также точка может содержать некоторое описание, которое используется для уточнения ее данных и будет доступно пользователю.

Датчики считывают информацию об уровне загрязнения в определенных координатах в текущий момент времени. Так, стационарные датчики обновляют данные в конкретной точке, тогда как мобильные датчики, изменяя свое местоположение, могут обновлять информацию нескольких точек в зависимости от заданного маршрута следования. Для каждого перемещения между узлами можно зафиксировать его метрику/стоимость (время перемещения, расстояние и уровень загрязненности).

Таблица 1 – Оценка скорости работы алгоритмов

Название алгоритма	Количество вершин графа		
	100	500	1000
Дейкстры	5 мс	149 мс	557 мс
Беллмана – Форда	5 мс	692 мс	5553 мс
A*	10 мс	307 мс	1334 мс
Флойда – Уоршелла	809 мс	93093 мс	747015 мс
Джонсона	1233 мс	140339 мс	1116097 мс

Это позволяет рассматривать данный набор сведений как ориентированный взвешенный граф.

Для поиска оптимального маршрута между двумя точками, которые, по сути, являются вершинами графа, могут применяться различные алгоритмы. Наиболее подходящими для решения нашей задачи можно считать методы, основанные на использовании алгоритмов Дейкстры, Флойда – Уоршелла, Джонсона, Беллмана – Форда и т. п. Рассмотренные алгоритмы реализуют различные варианты построения дерева кратчайших путей без перебора всех возможных. Многие из них имеют практическую реализацию и хорошо зарекомендовали себя на практике [3]. Сравним данные алгоритмы по скорости нахождения кратчайшего пути (табл. 1).

Для поиска кратчайшего маршрута из одной вершины в другую лучше всего себя зарекомендовал алгоритм Дейкстры, который показывает высокое быстродействие и применим для реализации поставленной задачи.

Рассматриваемый алгоритм состоит из следующих шагов [4]:

1. Всем вершинам за исключением первой, присваивается вес, равный бесконечности, а первой вершине – 0.
2. Все вершины не выделены.
3. Первая вершина объявлена текущей.
4. Вес всех невыделенных вершин пересчитывается по формуле. Вес невыделенной вершины есть минимальное число старого веса данной вершины,

суммы веса текущей вершины и веса ребра, соединяющего текущую вершину с невыделенной.

5. Среди невыделенных вершин ищется вершина с минимальным весом. Если таковая не найдена, т. е. вес всех вершин равен бесконечности, то маршрут не существует и происходит выход из цикла. В противном случае текущей становится найденная вершина, которая и выделяется.

6. Если текущей вершиной является конечная, то путь найден и его вес есть вес конечной вершины.

7. Переход к шагу 4.

В нашем случае алгоритм Дейкстры будет подвержен модификациям, т. к. эталонный вариант не может построить путь, а может только найти минимальную метрику маршрутов в графе от одной точки до всех остальных. Программа должна не только строить оптимальный маршрут по контрольным точкам пути, но и учитывать координаты датчиков, их уровни загрязнения. Алгоритм просчитывает расстояние между точками и умножает на коэффициент, который зависит от загрязненности. Таким образом, датчики, расположенные рядом, но обладающие большим уровнем загрязненности, будут огибаться при построении маршрута, т. к. в построенном графе имеют достаточно большую стоимость прохождения. Для построения пути спроектирован класс Multilist, который, помимо значений вершины, помеченной алгоритмом, будет хранить информацию о текущей, предыдущей и следующей вершинах. Это позволит алгоритму, кроме вычисления общей метрики прохода из точки А в точку Б, определить еще и сам маршрут.

Эвристическая функция «расстояние + стоимость» –  $f(x)$  определяет порядок обхода вершин. Эта функция является суммой функции стоимости достижения рассматриваемой вершины ( $x$ ) из

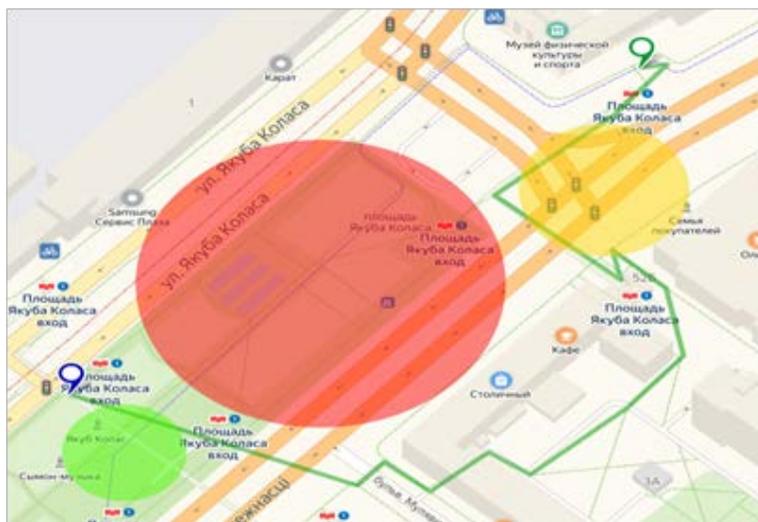


Рисунок 1 – Пример маршрута с обходом опасной зоны



Рисунок 2 – Пример оптимального маршрута

начальной  $k(x)$  и функции эвристической оценки расстояния от рассматриваемой вершины к конечной  $n(x)$  [5].

В начале работы просматриваются узлы, смежные с начальным, и выбирается узел с минимальным значением  $f(x)$ , после чего он раскрывается. На каждом этапе алгоритм оперирует множеством путей из начальной точки до всех еще не раскрытых вершин графа, которые размещаются в очереди с приоритетом. Приоритет пути определяется по наименьшему значению  $f(x) = k(x) + n(x)$ . Алгоритм продолжает свою работу, пока значение  $f(x)$  целевой вершины не окажется меньшим, чем любое значение в очереди, либо пока все дерево не будет просмотрено. Из множества решений выбирается решение с наименьшей стоимостью.

Так как для расчета оптимального пути используются весовые коэффициенты узлов графа, которые являются условной оценкой загрязненности воздуха для данной конкретной точки, необходим алгоритм, способный с достаточной степенью точности интерполировать значения загрязненности окрестных точек, где этот параметр известен, на узлы маршрутного графа. Таким алгоритмом может выступать триангуляция Делоне [6].

Рассмотрим работу алгоритма поиска оптимального пути в условиях загрязнения воздуха. В качестве пользовательского интерфейса ИС поиска оптимального маршрута выбран сервис «Яндекс.Карты».

Для нахождения оптимального маршрута движения с учетом актуальных показателей загрязнения воздуха в рассматриваемом районе пользователь заходит на веб-страницу и последовательно выбирает две контрольные точки, между которыми необходимо проложить маршрут. ИС обрабатывает полученный запрос, после чего на карту выводится проложенный маршрут в виде линии, а также зоны экологического мониторинга, через которые он проходит, с указанием актуальной обстановки в каждой из них. Зеленый круг означает безопасность нахождения в данной зоне, желтый – относительную безопасность, красный – высокую опасность [7].

На рис. 1 можно увидеть, что маршрут проходит в обход опасной зоны загрязнения, минимизируя риск подвергнуться негативному влиянию вредных веществ в атмосферном воздухе. В то же время он строится таким образом, чтобы быть наиболее коротким и экономить время пользователя.

Если уровень загрязнения в красной зоне снизился ниже предельно допустимых концентраций, т. е. зона стала пригодной для нахождения, значение

ее коэффициента опасности изменяется. После этого система автоматически перестраивает маршрут на основании актуальных данных, что позволяет сократить общее время нахождения на маршруте (рис. 2).

Испытания ИС показали ее надежность, высокую скорость обработки данных и построения маршрута.

**Заключение.** Разработан усовершенствованный алгоритм нахождения оптимального безопасного маршрута перемещения в городе между двумя точками при наличии альтернативных (множества возможных) маршрутов на основе алгоритма Дейкстры. Критериями оптимальности являются загрязненность воздуха, расстояние и время.

На основе разработанного алгоритма создана ИС, позволяющая находить оптимальный маршрут с учетом уровня загрязненности воздуха.

Результаты тестирования алгоритма и созданной на его основе ИС показывают, что они являются оптимальными и быстродействующими по сравнению с существующими.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сайт ВОЗ [Электронный ресурс]. / Режим доступа: <https://www.who.int/en/news-room/detail/27-09-2016-who-releases-country-estimates-on-air-pollution-exposure-and-health-impact>. Дата доступа: 14.11.2019.
2. **Рябычина, О.П.** Информационная подсистема анализа загрязнения атмосферного воздуха / О.П. Рябычина, В.А. Рыбак // Научно-производственный журнал «Веснік сувязі» №2 (149), Минск – 2019.
3. Алгоритм Дейкстры, Флойда, Беллмана – Форда [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.intuit.ru/studies/courses/12181/1174/lecture/25268?page=3>. Дата доступа: 14.11.2019.
4. **Алексеев, В.Е., Таланов, В.А.** Нахождение кратчайших путей в графе. Графы. Модели вычислений. Структуры данных. Учебник. – Нижний Новгород. Издание Нижегородского гос. Университета 2005 – с 236–237. – 307с.
5. **Графова, А.Е.** Алгоритмы поиска пути беспилотным транспортным средством в производственном цехе / А.Е. Графова, В.И. Головин // Международный научный журнал «Инновационная наука». – №1/2016. ISSN 2410-6070.
6. **Скворцов, А.В.** Триангуляция Делоне и ее применение. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 128 с. ISBN 5-7511-1501-5.
7. **Рябычина, О.П.** Разработка веб-сервиса для поиска оптимального маршрута движения с учетом загрязнения воздуха / О.П. Рябычина, М.В. Колбун // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи: материалы XIX науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов, 14 мая–15 мая 2019 года, Минск, Респ. Беларусь – Минск: БГАС, 2019. – С. 40.

*This article is devoted to the software implementation of the task of finding the optimal route in the air pollution monitoring system, which is used as part of an information system and is intended to inform users about air pollution in the city. Based on the given start and end points of the route and data on air pollution coming from the sensors, the system calculates the optimal route. The article discusses the algorithm and the implemented solution to the problem of finding the optimal path. The description of the search algorithm is given.*

Получено 19.11.2019.