

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-153-169>

Разработка авторского метода построения маршрутов ликвидации стихийных несанкционированных свалок

И.О. Кирильчук¹ ✉, А.В. Иорданова¹, В.В. Юшин¹, В.М. Попов¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: iraida585@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данной статьи является разработка метода построения маршрута ликвидации стихийно образующихся несанкционированных свалок на территории муниципального образования субъекта Российской Федерации.

Методы. Разработка метода построения маршрутов ликвидации несанкционированных свалок базируется на теории графов, включающей алгоритмы нахождения кратчайшего пути: алгоритм Дейкстры, алгоритм Флойда-Уоршелла, алгоритм Форда-Беллмана, цикл Гамильтона и др. Проведя анализ особенностей использования перечисленных алгоритмов, авторами разработан метод составления маршрута ликвидации несанкционированных свалок на основе Гамильтонова цикла.

Результаты. Задача построения маршрута сводится к выбору тех несанкционированных свалок из обнаруженных, которые будут приняты в качестве вершин графа, между которыми необходимо найти кратчайший путь. Авторский подход к формированию набора вершин графа состоит в следующем. На первом этапе задаются начальные и граничные условия. В качестве нулевой вершины графа выбирается стоянка спецтехники (мусоровозов), в качестве последней (n-ой) вершины – полигон ТКО. При этом необходимо учесть, что после транспортировки отходов со свалок к месту их захоронения (полигону), мусоровоз должен вернуться к месту стоянки. Учитываемыми ограничениями являются максимальное расстояние, которое может без дозаправки проехать мусоровоз, и объем кузова мусоровоза. Далее в качестве первой вершины графа выбирается наиболее близкая к отправной точке несанкционированная свалка, представляющая наибольшую опасность для окружающей среды. В качестве второй и т.д. вершин выбираются ближайшие к первой вершине несанкционированные свалки. Поиск вершин продолжается до тех пор, пока выполняются неравенства, учитывающие заданные ограничения. Далее происходит формирование графа, матрицы смежности, построение маршрута. При таком подходе для построения маршрута оптимальным является использование цикла Гамильтона, который обеспечивает нахождение минимального пути между всеми вершинами графа и возвращается в исходную точку.

Заключение. Применение авторского метода для составления маршрутов ликвидации несанкционированных свалок позволит оперативно осуществлять уборку обнаруженных в черте города несанкционированных свалок, что существенно снизит экологическую нагрузку на окружающую природную среду.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы; несанкционированные свалки; маршрут ликвидации; граф; матрица смежности; цикл Гамильтона.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Кирильчук И.О., Иорданова А.В., Юшин В.В., Попов В.М., 2020

Финансирование. Работа выполнена в рамках Гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-941.2019.5.

Для цитирования: Разработка авторского метода построения маршрутов ликвидации стихийных несанкционированных свалок / И.О. Кирильчук, А.В. Иорданова, В.В. Юшин, В.М. Попов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(2): 153-169. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-153-169>.

Поступила в редакцию 10.02.2020

Подписана в печать 31.03.2020

Опубликована 20.04.2020

Development of the Authors' Method for Arranging Routes for Elimination of Unauthorized Dumps

Iraida O. Kirilchuk ¹ ✉, Anastasia V. Iordanova ¹, Vasily V. Yushin ¹,
Victor M. Popov ¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: iraida585@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a method for arranging routes for elimination of spontaneously formed unauthorized dumps on the territory of a municipal formation of a constituent entity of the Russian Federation.

Methods. The development of a method for arranging routes for elimination of unauthorized dumps is based on the theory of graphs, which includes algorithms for finding the shortest path: Dijkstra's algorithm, Floyd-Warshall algorithm, Ford-Bellman algorithm, Hamiltonian cycle, etc. Having analyzed the peculiarities of using the listed algorithms, the authors have developed a method for arranging a route for the elimination of unauthorized dumps based on the Hamiltonian cycle.

Results. The task of arranging a route is reduced to choosing those unauthorized dumps from the detected ones, which will be accepted as the vertices of the graph, between which it is necessary to find the shortest path. The authors' approach to the formation of a set of vertices of the graph is as follows. At the first stage, the initial and boundary conditions are set. The parking of special equipment (garbage trucks) is selected as the zero vertex of the graph, and the SMW polygon is selected as the last (n^{th}) vertex. In this case, it should be taken into account that after transporting waste from dumps to the place of their burial (landfill), the garbage truck must return back to the parking place. The limits taken into consideration are the maximum distance that the garbage truck can travel without refueling and the volume of the garbage truck body. Then, the closest to the starting point unauthorized dump which represents the greatest danger to the environment is chosen as the first vertex of the graph. An unauthorized dump closest to the first peak is chosen as the second, etc.. The search for vertices continues until the inequalities that take into account the given constraints are satisfied. Next, a graph, an adjacency matrix, and a route are formed. With this approach, for arranging a route, it is optimal to use the Hamiltonian cycle, which ensures finding the minimum path between all the vertices of the graph and returns to the starting point.

Conclusion. Application of the authors' method for arranging routes for elimination of unauthorized dumps will make it possible to promptly clean up unauthorized dumps found in the city, which will significantly reduce the environmental load.

Keywords: solid municipal waste; unauthorized dumps; route for elimination; graph; adjacency matrix; Hamiltonian cycle.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The work was carried out as part of a Grant from the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists МК-941.2019.5.

For citation: Kirilchuk I. O., Iordanova A.V., Yushin V. V., Popov V. M. Development of the Authors' Method for Arranging Routes for Elimination of Unauthorized Dumps // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 153-169 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-153-169>.

Received 10.02.2020

Accepted 31.03.2020

Published 20.04.2020

Введение

В соответствии с ежегодными Государственными докладами обстановка с управлением отходами является весьма неутешительной и имеет тенденцию к ухудшению – кроме стабильного увеличения числа отходов, каждый год возрастают расходы на перевозку, переработку и размещение промышленных и твердых коммунальных отходов [1].

На территории Российской Федерации максимальное число отходов формируется в крупных агломерациях, где сконцентрированы промышленные предприятия и урбанизированные территории. Это приводит к засорению пригородных участков и прилегающих к муниципальным округам естествен-

ных ландшафтов как промышленными отходами (возле мест их образования), так и твердыми коммунальными отходами. Особую опасность представляют несанкционированные свалки, которые являются одним из значимых факторов техногенного воздействия [2-4].

Количество несанкционированных свалок также продолжает неуклонно расти. При этом, если не предпринять каких-либо действенных мер по борьбе с образованием стихийных свалок, размер прошлого экологического ущерба в количественном отношении может возрасти почти до 22 тысяч несанкционированных свалок твердых коммунальных отходов. Воздействие несанкционированных свалок на окружающую природную среду представлено на рис. 1.

Компоненты окружающей среды	Виды воздействия	Последствия
Атмосферный воздух	Выделяются в воздух вредные и дурнопахнущие газы: - окислы азота; окись углерода; фенол; аммиак; сероводород; толуол; ксилол, скатол, метан, меркаптан, водород, ртуть металлическая, бензол, трихлорметан, 4-х хлористый углерод, хлорбензол. Создают опасность пожаров.	Загрязнение атмосферного воздуха. Накопление токсичных веществ в растительном сообществе. Уничтожение растительности и почвенной биоты вследствие пожаров, возникающих на свалках. Загрязнение почвенного слоя вследствие выпадения загрязненных осадков.
Поверхностные водные источники	В результате миграции с водными потоками - загрязнение поверхностных вод азотистыми, хлорсодержащими, сульфатными и др. соединениями, ухудшение качества водных ресурсов: повышение минерализации, жесткости воды, повышенные значения тяжелых металлов в воде и донных отложениях, повышение ХПК.	Ограничения водопользования, сокращение водной биоты
Грунтовые воды	Проникновение в водоносные горизонты загрязняющих веществ. Бактериологическое загрязнение.	Ограничение водопользования, хозяйственного использования вод.
Почвы	Нагревание, отложение пыли, уплотнение почвы, эвтрофикация при активном разложении мусора, дефицит воздуха в почве	Изъятие земель из сельскохозяйственного оборота. Затраты на восстановление земель. Гибель почвенных бактерий, насекомых. Мутации в растительном сообществе.
Растительность	Увеличивает содержание в листьях и ветвях тяжелых металлов, которые воздействуют на клеточный метаболизм, затрудняя дыхание растений.	Распространение и массовый рост эвритопных (растущих повсеместно) рудеральных (мусорных) растений и вымирание неустойчивых видов. Сокращение выпасов. Загрязнение продуктов растениеводства.
Животные	Распространение животных, переносчиков бактериологического заражения: грызунов, насекомых, птиц.	Дисбаланс видового состава насекомых, птиц и других животных. Рост инфекционных заболеваний.

Рис. 1. Воздействие несанкционированных свалок на компоненты окружающей среды

Fig.1. The impact of the unauthorized dumps on the environment

Все вышесказанное подтверждает наличие проблемы, оставление которой без решения может привести к реальной угрозе причинения непоправимого вреда окружающей среде. В связи с этим остро встает вопрос о необходимости оперативного обнаружения и ликвидации образующихся несанкционированных свалок. При этом решение данной проблемы требует комплексного и системного подхода.

Таким образом, **цель исследования** состоит в разработке метода построения оптимального маршрута ликвидации стихийно образующихся несанкциониро-

ванных свалок на территории муниципального образования субъекта Российской Федерации.

Большинство логистических систем при построении маршрутов используют различные алгоритмы обхода вершин в графе [5]. К настоящему времени накоплен значительный опыт применения указанных алгоритмов для решения разнообразных прикладных задач [6-9]. На основе данных исследований можно провести анализ особенностей использования алгоритмов для построения маршрутов между заданными точками (табл. 1).

Таблица 1. Анализ особенностей использования алгоритмов нахождения пути

Table 1. Analysis of the use of path finding algorithms

Название алгоритма	Характеристика найденного пути	Направление поиска	Анализ стоимости пройденного пути
Поиск в ширину	Находит кратчайший путь	Поиск по всем направлениям	Ортогональные и диагональные шаги равны
Поиск в глубину	Найденное решение не всегда является кратчайшим маршрутом	Поиск в направлении соседней вершины, находящейся ближе к цели	Возможна оценка стоимости пройденного пути
Лучший-первый	Найденное решение не всегда является кратчайшим маршрутом	Поиск по прямой к цели	Не учитываются накопленная стоимость пути и особенности местности
Разделяй и властвуй	Найденное решение не всегда является кратчайшим маршрутом	Поиск по прямой к цели	Не учитываются накопленная стоимость пути и особенности местности
Алгоритм Дейкстры	Находит кратчайший путь	Поиск по всем направлениям	Оценка стоимости пройденного пути с учетом особенностей местности
Волновой алгоритм	Находит кратчайший путь	Поиск по всем направлениям	Ортогональные и диагональные шаги равны
Алгоритм A*	Находит кратчайший путь	Поиск по прямой к цели	Оценка стоимости пройденного пути с учетом особенностей местности

Анализ последних исследований в рассматриваемой предметной области позволил выделить работу [10], в которой авторы для решения поставленной задачи, т.е. составления маршрута сбора и транспортировки отходов, используют модифицированный алгоритм Дейкстры.

Алгоритм Дейкстры – один из самых распространенных алгоритмов нахождения кратчайшего маршрута. Его суть заключается в составлении матрицы смежности путем последовательного просчета всех ближайших к начальной точек и сопоставления весов ребер графа (в нашем случае – расстояний между свалками) для выбора наименьшего значения. В данном алгоритме веса ребер принимать отрицательные значения не могут. Количество операций, за которое алгоритм находит кратчайший маршрут, определяется как n^2 , где n – количество верши графа [6].

На основе анализа результатов исследования основных характеристик различных методов поиска кратчайшего пути в графе, проведенного в [11], возможно оценить время работы алгоритма Дейкстры в зависимости от количества вершин графа (табл. 2).

Таким образом, использование алгоритма Дейкстры является оптимальным для решения задач нахождения кратчайшего пути в неориентированных графах с различными весами.

Таблица 2. Зависимость оперативности построения маршрута с использованием алгоритма Дейкстры [11]

Table 2. Dependence of the promptness of arranging route using Dijkstra's algorithm

Количество вершин	Время работы алгоритма, с
1000	1,6
2000	6,5
4000	26
8000	105
10000	163,8

Материалы и методы

В условиях ограниченных финансовых ресурсов возникает необходимость разработки приоритетов экологической политики. Применительно к рассматриваемой нами цели построения оптимального маршрута для устранения несанкционированных свалок это означает, что при ограничениях, которыми являются максимальное расстояние, которое может без дозаправки проехать мусоровоз, и объем кузова мусоровоза, первоочередной ликвидации должны быть подвергнуты наиболее опасные с экологической точки зрения несанкционированные свалки.

На основе данных, предоставляемых интернет-порталом по учету стихийных несанкционированных свалок (<http://dev.swsu.ru/>) формируются двумерные массивы стихийных несанкционированных свалок, содержащие расстояния между ними и основные характеристики свалок, которые будут учитываться при составлении маршрута

(класс экологической опасности свалки и ее объем) [12-15]. Задача построения маршрута сводится к выбору тех несанкционированных свалок из обнаруженных, которые будут приняты в качестве вершин графа, между которыми необходимо построить оптимальный маршрут.

Авторский подход к формированию набора вершин графа состоит в следующем.

На первом этапе задаются начальные и граничные условия. В качестве нулевой вершины графа выбирается стоянка спецтехники (мусоровозов), в качестве последней (n-ой) вершины – полигон ТКО. При этом необходимо учесть, что после транспортировки отходов со свалок к месту их захоронения (полигону), мусоровоз должен вернуться к месту стоянки.

Учитываемыми ограничениями, как было указано выше, являются: максимальное расстояние, которое может без дозаправки проехать мусоровоз (R_{max}), и объем кузова мусоровоза (V_{max}).

Вторым шагом является поиск первой вершины. В качестве первой вершины графа выбирается наиболее близкая к отправной точке несанкционированная свалка, представляющая наибольшую опасность для окружающей среды, то есть имеющая наименьшее значение класса экологической опасности:

$$R_{0-1} = \min \text{ и } K_1 = \min.$$

Если объем свалки (V_1) не превышает объем мусоровоза, а суммарное

расстояние от начальной точки до свалки, от свалки до полигона и от полигона до стоянки спецтехники не превышает R_{max} , то есть одновременно выполняются следующие неравенства:

$$V_{max} > V_1$$

$$R_{max} > R_{0-1} + R_{1-n} + R_{n-0},$$

то переходим к третьему шагу, иначе к четвертому шагу (строим маршрут между заданными вершинами графа).

Третий этап заключается в поиске второй и последующих вершин графа. В качестве второй и т.д. вершин выбираются ближайшие к первой вершине несанкционированные свалки. Поиск вершин продолжается до тех пор, пока выполняются неравенства, учитывающие суммарный объем свалок и расстояния между ними.

Четвертый шаг состоит в формировании графа, матрицы смежности, построении маршрута. В случае, если к 4-му шагу переходим, минуя 3-й, то маршрут строится только между вершинами 0-1-n.

Таким образом, для нахождения маршрута ликвидации отобранных с использованием авторского подхода свалок необходимо использовать алгоритмы построения оптимального маршрута, к которым относятся алгоритмы решения транспортных задач (задача коммивояжера, задача кольцевого маршрута).

Для решения подобного рода задач наибольшее распространение в настоящее время получили следующие алгоритмы: муравьиный, генетический, а

также метод полного перебора и метод ветвей и границ. Особенности использования данных методов и алгоритмов рассмотрены в работах [16-20]. Необходимо отметить, что эффективность работы муравьиного и генетического алгоритмов возрастает с увеличением количества вершин графа, в то время как использование методов ветвей и границ и полного перебора не приводит к решению задачи нахождения оптимального маршрута. Однако экспериментальные исследования возможностей использования данных методов и алгоритмов в задачах построения маршрута

ликвидации стихийных несанкционированных свалок показали, что в рамках одного маршрута возможно ликвидировать не более 10 свалок в связи с ограниченным объемом кузова мусоровоза. Таким образом, проведем сравнительный анализ количественных характеристик перечисленных методов построения оптимального маршрута в графе с десятью вершинами (табл. 3.).

В связи с вышеизложенным в предлагаемом авторами методе нахождение оптимального маршрута осуществляется посредством поиска цикла Гамильтона с использованием метода ветвей и границ.

Таблица 3. Сравнительный анализ методов построения оптимального маршрута для 10 вершин

Table 3. Comparative analysis of the methods for arranging an optimal route for 10 vertexes

№	Наименование метода/алгоритма	Характеристики	
		Длина маршрута, км	Время решения, мин
1	Муравьиный алгоритм	33	1,1
2	Генетический алгоритм	34	1,3
3	Метод полного перебора	32	0,39
4	Метод ветвей и границ	33	0,042

Алгоритм формирования оптимального маршрута по авторскому методу представлен на рис. 2. Алгоритм поиска цикла Гамильтона в графе представлен на рис. 3.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим пример использования предложенного авторами подхода к построению маршрута ликвидации стихийных свалок. Пусть в качестве вер-

шин графа было отобрано 5 несанкционированных свалок. Учитывая нулевую вершину (стоянку спецтехники) и последнюю (полигон ТКО), общее количество вершин сформированного графа будет равно 7.

Матрица смежности, содержащая веса ребер графа, то есть расстояния между его вершинами (несанкционированными свалками), представлена в табл. 4.

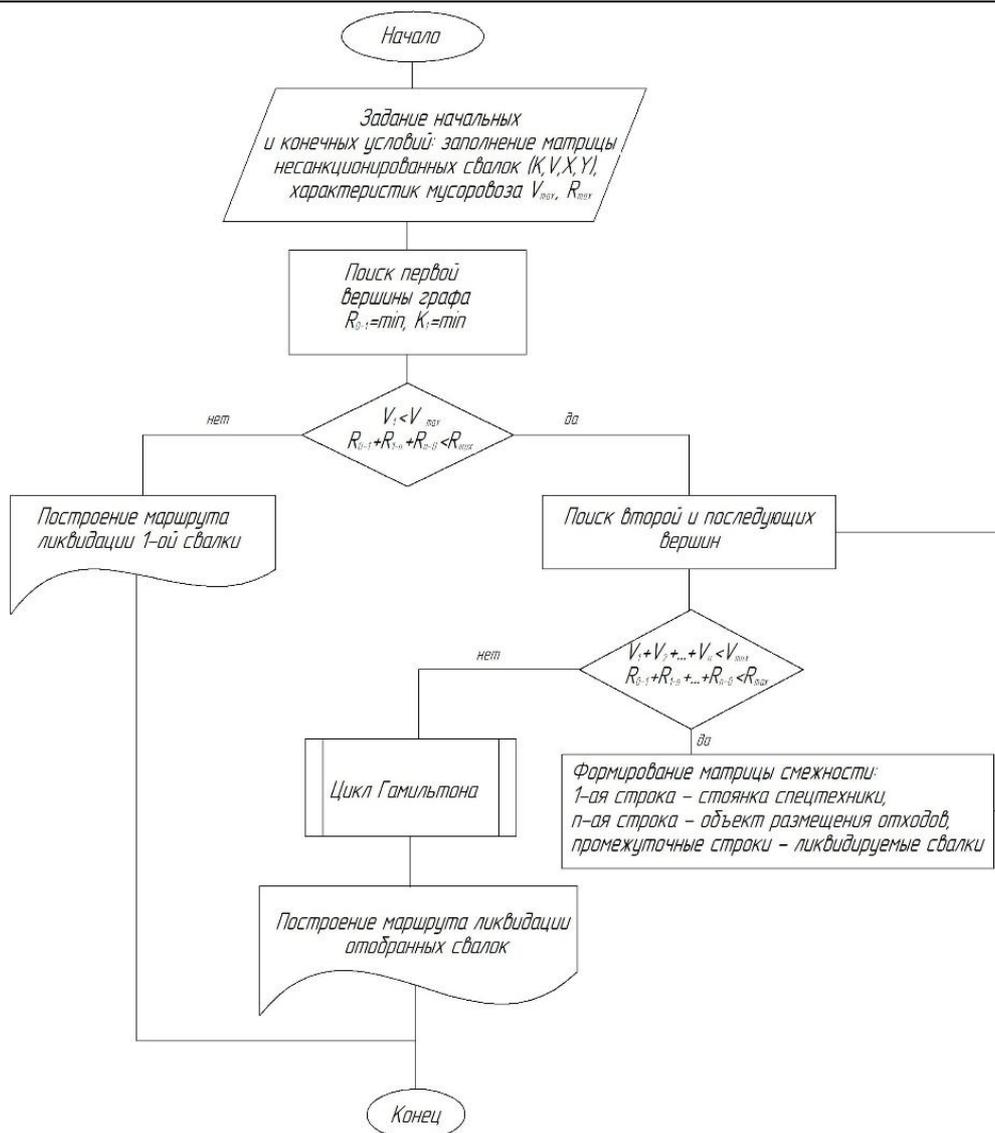


Рис. 2. Алгоритм формирования маршрута

Fig. 2. The algorithm for the route formation

Таблица 4. Матрица смежности сформированного графа

Table 4. Adjacency matrix of the formed graph

	0	1	2	3	4	5	6 (n)
0	0	1	0	0	0	3	7
1	1	0	0	3	0	5	0
2	0	0	0	0	4	3	7
3	0	3	0	0	5	1	0
4	0	0	4	5	0	3	0
5	3	5	3	1	3	0	6
6 (n)	7	0	7	0	0	6	0

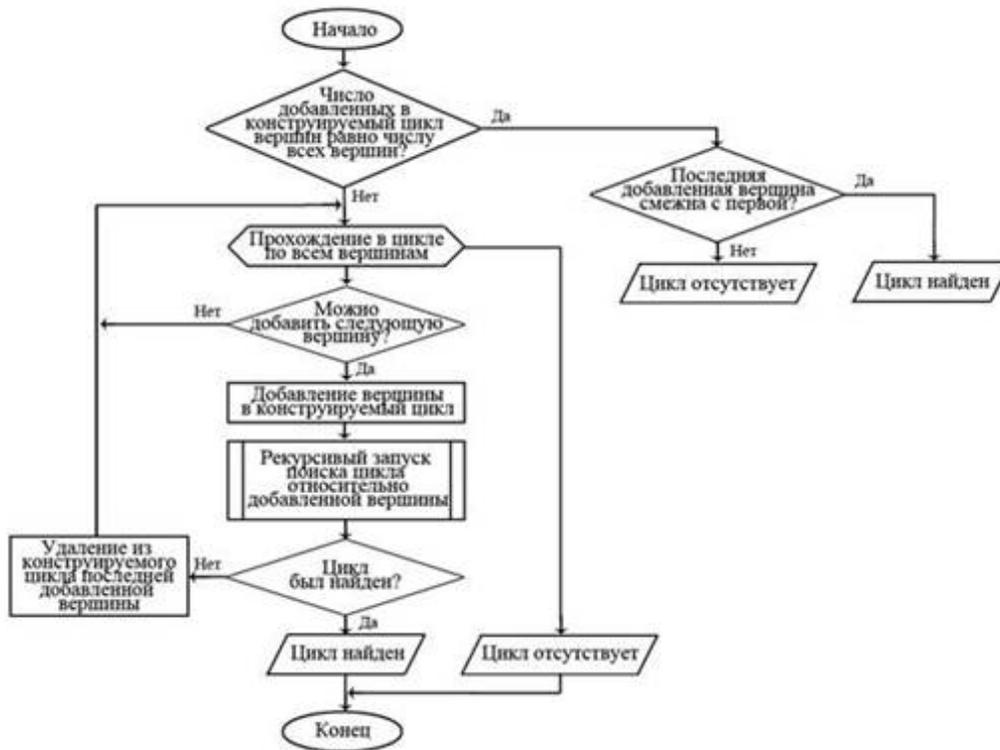


Рис. 3. Алгоритм поиска цикла Гамильтона в графе

Fig. 3. The algorithm for searching Hamiltonian cycle in the graph

Полученный граф представлен на рис. 4.

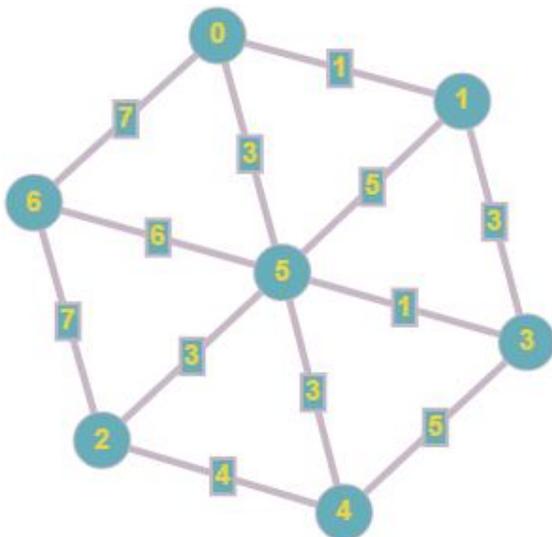


Рис. 4. Сформированный граф

Fig. 4. Generated graph

Главным условием реализации цикла Гамильтона является то, что каждая вершина должна быть посещена

максимум один раз. Визуализация построенного маршрута ликвидации несанкционированных свалок представлена на рис. 5.

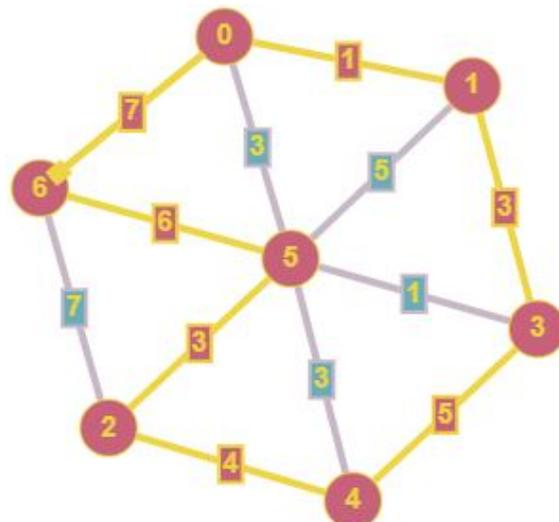


Рис. 5. Визуализация построенного маршрута ликвидации

Fig. 5. Visualization of the arranged route of dumps elimination

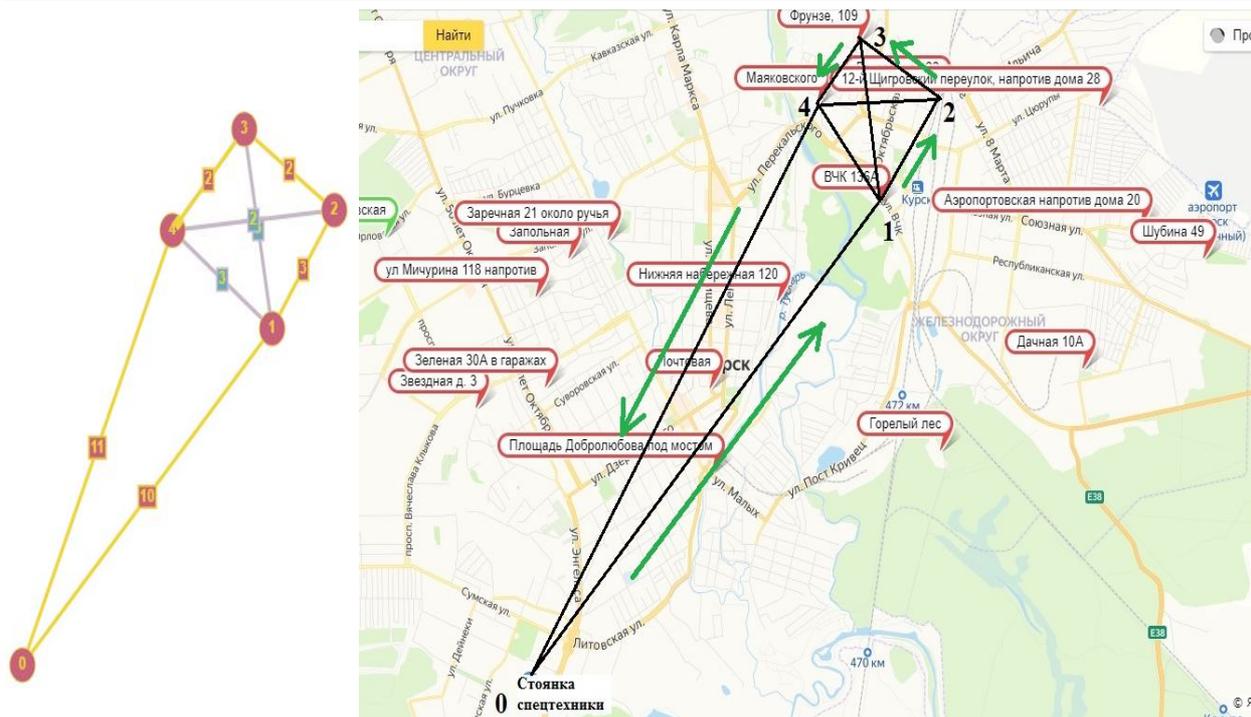


Рис. 7. План маршрута санитарной уборки несанкционированных свалок в Железнодорожном округе г. Курска

Fig. 7. Route plan for sanitary cleaning of unauthorized dumps in the Kursk Railway district

На заключительном этапе исследования проведен сравнительный анализ авторского метода построения маршрутов ликвидации стихийных несанкционированных свалок и модифицированно-

го алгоритма Дейкстры, используемого для составления маршрута сбора и транспортировки отходов в [11]. Результаты анализа представлены в табл. 5.

Таблица 5. Сравнительный анализ алгоритмов на примере ликвидации свалок в Железнодорожном и Центральном округе г. Курска

Table 5. Comparative analysis of the algorithms considering dumps elimination in the Railway and Central districts of Kursk

Наименование округа	Наименование алгоритма	Характеристики				
		Длина маршрута, км	Время работы алгоритма, сек	Кол-во убранного мусора, м ³	Ликвидированные свалки	Класс опасности свалки
Железнодорожный	Авторский метод	28	3	19	Ул. ВЧК, 136а	1
					Ул. Вокзальная, 33	2
					Ул. Фрунзе, 109	3
					Ул. Маяковского	3
	Алгоритм Дейкстры	20	0,03	18	Ул. Пост Кривец 11в	3
					Горелый лес	2
					Ул. Соловьиная, 32	5
				Ул. Новоселовка, 54	4	

Наименование округа	Наименование алгоритма	Характеристики				
		Длина маршрута, км	Время работы алгоритма, сек	Кол-во убранного мусора, м ³	Ликвидированные свалки	Класс опасности свалки
Центральный	Авторский метод	28	3,5	20	Ул. Заречная, 21	1
					Ул. Запольная	2
					Ул. Мичурина, 118	2
					Ул. Зеленая, 30 А	3
	Алгоритм Дейкстры	23	0,04	18	Ул. Звездная, 3	4
					Ул. Добролюбова	2
					Ул. Почтовая	2
					Ул. Зеленая, 30 А	3
Ул. Звездная, 3	4					

Экспериментальная проверка рассмотренных алгоритмов на примере построения маршрутов на территории г. Курска показала, что при использовании авторского метода первой вершиной является свалка с наибольшим классом экологической опасности, а при использовании алгоритма Дейкстры первой вершиной является ближайшая к стоянке спецтехники несанкционированная свалка.

Выводы

Таким образом, несмотря на то, что алгоритм Дейкстры является более опе-

ративным и строит более короткий маршрут между заданными точками по сравнению с авторским методом, использование последнего для составления маршрутов ликвидации стихийных несанкционированных свалок позволяет учитывать их экологическую опасность и составлять планы санитарной уборки города, основываясь на приоритетах природоохранной политики и обеспечения экологической безопасности населения.

Список литературы

1. Иорданов А.А., Гнездилова А.В. Государственное управление в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами // Молодежь и XXI век - 2017: материалы VII Международной молодежной научной конференции: в 4 т. Курск, 2017. С. 385-387.
2. Мартынова К.И., Иорданова А.В. Исследование загрязнения окружающей природной среды твердыми коммунальными отходами в Курской области // Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сборник статей XI Международной научно-практической конференции. Курск, 2019. С. 235-240.

3. Иорданова А.В. Исследование вклада междисциплинарных научных подходов в решение экологических проблем, связанных с утилизацией коммунальных отходов // Исторические, философские и методологические проблемы современной науки: сборник статей 2-й Международной научной конференции молодых ученых. Курск, 2019. С. 238-242.

4. Особенности процедуры оценки риска негативного воздействия объектов размещения отходов на окружающую среду и здоровье населения / В.В. Юшин, В.М. Попов, И.О. Кирильчук, А.Ю. Коровина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. № 3 (28). С. 36-49.

5. Ключкова Е.Н. Обоснование выбора алгоритма поиска пути решения задач построения маршрута к месту назначения // Вестник Московского университета МВД России. 2015. №5. С. 205-209.

6. Sven Peyer, Dieter Rautenbach, Jens Vygen. A generalization of Dijkstra's shortest path algorithm with applications to VLSI routing // Journal of Discrete Algorithms. 2009. №7. P. 377-390.

7. Chowdhury M., Rahman M., Boutaba R. Vineyard: Virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping // IEEE ACM Trans. Netw. 2012. Vol. 20(1). P. 206-219.

8. Pape U. Implementation and efficiency of moor-algorithms for the shortest route problem // Mathematical programming. 2012. 7. P. 212-222.

9. . Efficient algorithm for finding k shortest paths based on reoptimization technique / Bi Yu Chen, Xiao-Wei Chena, Hui-Ping Chen, William H.K. Lam // Transportation Research Part E. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554519305678>

10. Ладик А.С., Маслобоев А.В. Разработка автоматизированной информационной системы управления логистикой бытовых отходов (на примере г. Апатиты) // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19. № ½. С. 207-216.

11. Рамзаев В.М., Хаймович И.Н., Мартынов И.В. Методы поиска кратчайших путей на графах в организационно-экономических системах и их реализация // Информационные технологии и нанотехнологии: сборник V Международной конференции и молодёжной школы. Самара, 2019. С.1-8.

12. Оценка загрязнения городской среды с применением ГИС-технологий / В.М. Попов, Е.В. Меркулова, Н.А. Чепиков, И.О. Рыкунова // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство. Транспорт. 2008. № 2-18. С. 48-51.

13. Кирильчук И.О., Юшин В.В. Адаптированная система критериев типизации несанкционированных свалок // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. № 2 (23). С. 85-93.

14. Разработка элементов информационно-аналитической системы учета несанкционированных свалок / В.В. Юшин, В.М. Попов, И.О. Кирильчук, А.В. Гнездилова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8. № 3 (28). С. 68-80.

15. Юшин В.В., Кирильчук И.О. Геоинформационный учет и оценка опасности стихийных несанкционированных свалок // Безопасность жизнедеятельности. 2017. № 6 (198). С. 34-42.

16. Sabry A. H., Bacha A., Benhra J. A contribution to solving the traveling salesman problem using ant colony optimization and web mapping platforms Application to logistics in a urban context. in Codit'14, Metz, France, 2014.

17. Sabry A. H., Benhra J., Hicham E. H. Comparison of the performance of genetic algorithms and ant algorithms in relation to the traveling salesman problem // International Journal of Computer Applications. 2015. Vol.19. № 19.

18. Minji Choi, Seokho Chi. Optimal route selection model for fire evacuations based on hazard prediction data // Simulation Modelling Practice and Theory. 2019. Vol. 94. P. 321-333.

19. Анализ трудоемкости различных алгоритмических подходов для решения задачи коммивояжера / С. С. Семенов, А. В. Педан, В. С. Воловиков, И. С. Климов // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 116-131. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-01/08-Semenov.pdf>

20. Baldacci R., Mingozzi A., Roberti R. Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints // European Journal of Operational Research. 2012. Vol. 218. P. 1-6.

References

1. Iordanov A.A., Gnezdilova A.V. [Public administration in the field of solid municipal waste management]. *Molodezh' i XXI vek - 2017. Materialy VII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii. Molodezh' i XXI vek - 2017 materialy VII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Youth and the XXI century-2017. Proceedings of the VII International Youth Scientific Conference]. Kursk, 2017, pp. 385-387 (In Russ.)

2. Martynova K.I., Iordanova A.V. [Investigation of environmental pollution by solid municipal waste in the Kursk region]. *Aktual'nye problemy ekologii i okhrany truda. Sbornik statei XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of ecology and labor protection: collection of articles of the XI International scientific and practical conference]. Kursk, 2019, pp. 235-240 (In Russ.).

3. Jordanova A.V. [Research of the contribution of interdisciplinary scientific approaches to solving environmental problems related to the disposal of municipal waste]. *Istoricheskie, filosofskie i metodologicheskie problemy sovremennoi nauki. Sbornik statei 2-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh* [Historical, philosophical and methodological problems of modern science. Collection of articles of the 2nd International scientific conference of young scientists]. Kursk, 2019, pp. 238-242 (In Russ.).

4. Yushin V.V., Popov V.M., Kiril'chuk I.O., Korovina A.Yu. Osobennosti protsedury otsenki riska negativnogo vozdeistviya ob"ektov razmeshcheniya otkhodov na okruzhayushchuyu sredyu i zdorov'e naseleniya [Features of the procedure for assessing the risk of negative impact of waste disposal facilities on the environment and public health]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2018, no. 3 (28), pp.36-49 (In Russ.).

5. Klochkova E. N. Obosnovanie vybora algoritma poiska puti resheniya zadach postroeniya marshruta k mestu naznacheniya [Justification of the choice of the algorithm for finding a way to solve the problems of building a route to the destination]. *Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii = Vestnik of Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2015, no. 5, pp.205-209 (In Russ.).

6. Sven Peyer, Dieter Rautenbach, Jens Vygen. A generalization of Dijkstra's shortest path algorithm with applications to VLSI routing. *Journal of Discrete Algorithms*, 2009, no.7, pp. 377-390.

7. Chowdhury M., Rahman M., Boutaba R. Vineyard: Virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping. *IEEE ACM Trans. Netw*, 2012, no.20(1), pp. 206-219.

8. Pape U. Implementation and efficiency of moor-algorithms for the shortest route problem. *Mathematical programming*, 2012, 7, pp. 212-222.

9. Bi Yu Chen, Xiao-Wei Chena, Hui-Ping Chen, William H.K. Lam. Efficient algorithm for finding k shortest paths based on reoptimization technique. *Transportation Research Part E*. 2020. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554519305678>

10. Ladik A. S., Masloboev A.V. Razrabotka avtomatizirovannoi informatsionnoi sistemy upravleniya logistikoi bytovykh otkhodov (na primere g. Apatity) [Development of an automated information system for managing logistics of household waste (on the example of Apatity)]. *Vestnik MGTU = Vestnik of MSTU*, 2016, no. 19, 1: pp. 207-216. (In Russ.)

11. Ramzaev V. M., Khaimovich I. N., Martynov I. V. [Methods of searching for shortest paths on graphs in organizational and economic systems and their implementation]. *Sbornik V Mezhdunarodnoi konferentsii i molodezhnoi shkoly «Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii»* [Collection of the V International conference and youth school "Information technologies and nanotechnologies"]. Samara, 2019, pp. 1-8 (In Russ.)

12. Popov V.M., Merkulova E.V., Chepikov N.A., Rykunova I.O. Otsenka zagryazneniya gorodskoi sredy s primeneniem GIS-tekhnologii [Assessment of urban pollution using GIS technologies]. *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i transport = Proceedings of the Orel State Technical University. Series: Building. Stroitel'stvo. Transport*, 2008, no. 2-18, pp. 48-51 (In Russ.)

13. Kiril'chuk I.O., Yushin V.V. Adaptirovannaya sistema kriteriev tipizatsii nesanktsionirovannykh svalok [Adapted system of criteria for typing unauthorized dumps]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2017, no. 2 (23), pp. 85-93 (In Russ.)

14. Yushin V.V., Popov V.M., Kiril'chuk I.O., Gnezdilova A.V. Razrabotka elementov informatsionno-analiticheskoi sistemy ucheta nesanktsionirovannykh svalok [Development of elements of an information and analytical system for recording unauthorized dumps]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2018, vol. 8, no. 3 (28), pp. 68-80. (In Russ.)

15. Yushin V.V., Kiril'chuk I.O. Geoinformatsionnyi uchet i otsenka opasnosti stikhiiynykh nesanktsionirovannykh svalok [Geoinformation accounting and risk assessment of natural unauthorized dumps]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Life Safety*, 2017, no. 6 (198), pp. 34-42. (In Russ.)

16. Sabry A. H., Bacha A., Benhra J. A contribution to solving the traveling salesman problem using ant colony optimization and web mapping platforms Application to logistics in a urban context. in Codit'14, Metz, France, 2014.

17. Sabry A. H., Benhra J., Hicham E. H. Comparison of the performance of genetic algorithms and ant algorithms in relation to the traveling salesman problem. *International Journal of Computer Applications*. 2015, 19.

18. Minji Choi, Seokho Chi. Optimal route selection model for fire evacuations based on hazard prediction data. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2019, no. 94, pp. 321-333.

19. Semenov S. S., Pedan A. V., Volovikov V. S., Klimov I. S. Analiz trudoemkosti razlichnykh algoritmicheskikh podkhodov dlya resheniya zadachi kommivoyazhera [Analysis of the complexity of various algorithmic approaches for solving the traveling salesman problem]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Management Systems, communications and security*, 2017, no. 1, pp. 116-131. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-01/08-Semenov.pdf> (In Russ.)

20. Baldacci R., Mingozzi A., Roberti R. Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints. *European Journal of Operational Research*. 2012, no. 218, pp. 1-6.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кирильчук Ираида Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: iraida585@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8636-9340>.
Researcher ID: N-8966-2016

Иорданова Анастасия Владимировна, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru

Юшин Василий Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой охраны труда и окружающей среды, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: otios@mail.ru

Попов Виктор Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры охраны труда и окружающей среды, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: otios@mail.ru

Iraida O. Kirilchuk, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Labour and Environment Protection, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: iraida585@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8636-9340>.
Researcher ID: N-8966-2016

Anastasia V. Iordanova, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7780-497X>

Vasily V. Yushin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Labour and Environment Protection, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: otios@mail.ru

Victor M. Popov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Labour and Environment Protection, Honoured Worker of Higher Education of the Russian Federation, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: otios@mail.ru