

DOI:10.52897/TMS-2023-11-09



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ СЕМИНАР ПО РЕГИОНАЛЬНОЙ
ЭКОНОМИКЕ

на тему: **Модели определения оптимальных маршрутов
для перевозок твердых коммунальных
отходов и распределения их объемов».**

11 сентября 2023 г.

ВАЛЕНТИН АНДРЕЕВИЧ АНДРЕЕВ к.ф.-м.н., с.н.с.

Рецензент: к.т.н. Л.А. Лосин

Введение



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
РЕГИОНАЛЬНОЙ
ЭКОНОМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

В предлагаемой работе сформулирована и исследована оптимизационная модель перевозок твердых коммунальных отходов (ТКО) городской агломерации, осуществляемых комплексом переработки и утилизации отходов. В состав комплекса входят мусороперерабатывающие заводы, мусорные полигоны и транспортные предприятия. Под оптимизацией здесь понимается минимизация затрат (топливо, время, финансы) на перевозки ТКО от участков их накопления (мусорные площадки) до пунктов переработки (мусороперерабатывающие заводы) и захоронения (мусорные полигоны).

Формулировка и решение задачи

Задача минимизации затрат на перевозки ТКО решается в два этапа. На первом этапе решается задача построения оптимальных маршрутов между пунктами накопления и пунктами переработки отходов, по которым мусоровозы могут проехать с минимальными затратами. Задача решается на графе улично-дорожной сети (УДС). Предполагается, что для каждого участка УДС определены рассматриваемые виды затрат. Задача решается с помощью алгоритма Дейкстры (Левитин, 2006).

В результате решения задачи для каждого участка накопления i ТКО j и каждого пункта их переработки строится оптимальный (i, j) маршрут.

Затраты мусоровоза на проезд по маршруту, определяются равенством

$$z_{ij} = \sum_{k=1}^{m_{ij}} J_k^{ij}, \quad (1)$$

где m_{ij} - число участков, из которых состоит маршрут, k - номер участка,

J_k^{ij} - затраты мусоровоза на проезд по участку.



Формулировка и решение задачи

На втором этапе определяется оптимальный план распределения объемов перевозок ТКО между оптимальными маршрутами, реализация которого должна минимизировать затраты на перевозки, определяемые равенством

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_0+m_1} z_{ij} x_{ij}, \quad (2)$$

где z_{ij} - затраты на проезд груженого мусоровоза по маршруту (i, j)

n - число участков накопления ТКО, m_0 - число мусороперерабатывающих заводов, m_1 - число мусорных полигонов,

x_{ij} - число рейсов, выполненных мусоровозами за рассматриваемый период.

Минимизация затрат осуществляется на множестве планов, удовлетворяющих соотношениям:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = a_j, \quad \sum_{i=1}^n x_{ik} \leq a_k, \quad j \in \{1, \dots, m_0\}, \quad k \in \{m_0 + 1, \dots, m_0 + m_1\}, \quad (3)$$
$$\sum_{j=1}^{m_0+m_1} x_{ij} = b_i, \quad i \in \{1, \dots, n\}$$

где a_j - потребности мусороперерабатывающих заводов в ТКО, b_i - ограничения мусорных полигонов на захоронение ТКО, a_k - объемы ТКО, находящихся на участках накопления ТКО.

Формулировка и решение задачи

Сформулированная задача является несбалансированной транспортной задачей. Решение этой задачи сводится к решению сбалансированной транспортной задачи, которая решается методом потенциалов (Юдин 1961).

Для решения задач построения оптимальных маршрутов и распределения объемов перевозок между маршрутами автором разработано программное обеспечение в системе программирования C++Builder на языке C++ . Кроме того, для работы с исходными данными и результатами решения задач разработана база данных с помощью системы Paradox



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
РЕГИОНАЛЬНОЙ
ЭКОНОМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

Экспериментальная проверка модели

Проведена экспериментальная проверка предлагаемой модели.

Экспериментальные расчеты выполнены на примере УДС Василеостровского и Петроградского районов Санкт-Петербурга. Предполагается, что суммарный объем образующихся в этих районах ТКО равен объему ТКО, образующихся в Санкт-Петербурге. Часть отходов перерабатывается на мусоросортировочных заводах, которые планируется построить на территории Ленинградской области в населенных пунктах Волохонка, Брандовка, Новоселки. Остальные ТКО вывозятся на мусорные полигоны, расположенные в населенных пунктах Бугрово и Мшинская.

В Васильевском районе выделено четыре участка накопления ТКО. В Петроградском районе выделено три участка.



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
РЕГИОНАЛЬНОЙ
ЭКОНОМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК



В расчетах использованы следующие данные

Допустимые объемы размещения ТКО на полигонах (тыс. тонн/год)

Объем ТКО	480	504

Мощности мусоросортировочных заводов (тыс. тонн/год)

Мощности	228	336	204

Объемы ТКО, накапливаемых на участках Васильевского района

Объем ТКО тыс. тонн/ год	240	240	240	144

Объемы ТКО, накапливаемых на участках Петроградского района

Номер участка	1	2	3
Объем ТКО тыс. тонн/ год	240	240	72



Экспериментальная проверка модели

Рассматриваются случаи, когда перевозки ТКО осуществляются однотипными и разнотипными мусоровозами. В первом случае перевозки осуществляются мусоровозами, имеющими грузоподъемность 10 тонн, и решается задача минимизации затрат топлива на перевозки ТКО. Предполагается, что перевозки ТКО осуществляются полностью груженными мусоровозами.

Затраты топлива мусоровозами для участков УДС рассчитываются по формуле

$$J_k^{ij} = h_k^{ij} c \quad , \quad (4)$$

где h_k^{ij} - протяженность участка маршрута с номером k , $c = 0.28$ – расход топлива мусоровозом (литров на километр).

Экспериментальная проверка модели



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
РЕГИОНАЛЬНОЙ
ЭКОНОМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

Таблица 1

Затраты топлива грузеными мусоровозами на перемещение по оптимальным маршрутам с учетом холостых пробегов (литры)

Номера участков накопления ТКО	Мусоросортировочные заводы (мусорные полигоны)				
	Волхонка	<u>Брандовка</u>	Новоселки	<u>Бугрово</u>	<u>Мшинская</u>
Участок 1	23.62	39.18	20.67	65.81	16.57
Участок 2	22.52	38.07	19.57	64.71	16.23
Участок 3	22.29	38.38	19.87	64.10	17.44
Участок 4	21.64	37.73	19.22	63.46	17.05
Участок 5	23.01	36.10	18.06	65.20	17.66
Участок 6	23.66	35.53	17.59	65.85	18.32
Участок 7	23.91	35.67	17.11	66.11	18.57

Экспериментальная проверка модели



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
РЕГИОНАЛЬНОЙ
ЭКОНОМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

Таблица 2

Оптимальное распределение рейсов грузеных мусоровозов по маршрутам

Номера участков накопления ТКО	Мусоросортировочные заводы (мусорные полигоны)				
	Волхонка	<u>Брандовка</u>	Новоселки	<u>Бугрово</u>	<u>Мшинская</u>
Участок 1	0	0	0	0	240 00
Участок 2	0	0	0	0	240 00
Участок 3	22800	0	1200	0	0
Участок 4	0	0	0	144 00	0
Участок 5	9600	12000	0	2400	24 00
Участок 6	0	240 00	0	0	0
Участок 7	0	0	72 00	0	0

Экспериментальная проверка модели



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
РЕГИОНАЛЬНОЙ
ЭКОНОМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

Таблица 3

Начальное распределение рейсов грузеных мусоровозов по маршрутам

Номера участков накопления ТКО	Мусоросортировочные заводы (мусорные полигоны)				
	Волхонка	<u>Брандовка</u>	Новоселки	<u>Бугрово</u>	<u>Мшинская</u>
Участок 1	228 00	12 00	0	0	0
Участок 2	0	240 00	0	0	0
Участок 3	0	8400	156 00	0	0
Участок 4	0	0	4800	9600	0
Участок 5	0	0	0	240	0
Участок 6	0	0	0	14400	9600
Участок 7	0	0	0	0	72 00

~

Экспериментальная проверка модели

Анализ таблиц 1 и 2 показывает, что для оптимального распределения рейсов мусоровозов по оптимальным маршрутам расходы топлива при перевозке ТКО составляют 38 119 464 литров.

Анализ таблиц 1 и 3 показывает, что для начального распределения рейсов расходы топлива составляют 49 709 808 литров.

Таким образом, в рассматриваемом случае предлагаемый метод минимизации затрат топлива на перевозки ТКО позволит сэкономить не менее 11 590 344 литров.



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
РЕГИОНАЛЬНОЙ
ЭКОНОМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

Экспериментальная проверка модели

В случае с разнотипными мусоровозами решается задача минимизации затрат времени на перевозки ТКО. Предполагается, что Васильевский район обслуживают мусоровозы грузоподъемностью 10 тонн, а Петроградский – 15 тонн. Остальные исходные данные задачи не меняются.

Оптимальные маршруты определяются из решения задачи минимизации удельных затрат времени на транспортировку ТКО по маршрутам (час/тонна). Затраты рассчитываются по формуле

$$z_{ij} = \sum_{k=1}^{m_{ij}} J_k^{ij}, \quad (5)$$

где $J_k^{ij} = h_k^{ij} / (v_k^{ij} \omega^{ij})$, h_k^{ij} - протяженность (км.) участка маршрута (i, j) с номером k , v_k^{ij} - скорость движения (км./час) мусоровозов на участке k , ω^{ij} - вместимость мусоровозов (тонны), обслуживающих маршрут (i, j) , $z_{ij} \omega_{ij}$ - продолжительность рейса.



Экспериментальная проверка модели



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
РЕГИОНАЛЬНОЙ
ЭКОНОМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

Таблица 4

Затраты времени гружеными мусоровозами на перемещение по оптимальным маршрутам с учетом холостых пробегов (часы/тонну)

Номера участков накопления ТКО	Мусоросортировочные заводы (мусорные полигоны)				
	Волхонка	<u>Брандовка</u>	Новоселки	<u>Бугрово</u>	<u>Мшинская</u>
Участок 1	0.10	0.165	0.09	0.267	0.069
Участок 2	0.094	0.158	0.084	0.26	0.067
Участок 3	0.092	0.16	0.086	0.257	0.074
Участок 4	0.088	0.156	0.082	0.253	0.072
Участок 5	0.064	0.098	0.05	0.175	0.05
Участок 6	0.067	0.095	0.048	0.178	0.053
Участок 7	0.068	0.096	0.046	0.179	0.054

Экспериментальная проверка модели



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
РЕГИОНАЛЬНОЙ
ЭКОНОМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

Таблица 5

Оптимальное распределение объемов перевозок ТКО по маршрутам (тыс. тонн)

Номера участков накопления ТКО	Мусоросортировочные заводы (мусорные полигоны)				
	Волхонка	<u>Брандовка</u>	Новоселки	<u>Бугрово</u>	<u>Мшинская</u>
Участок 1	0	0	0	0	240
Участок 2	0	0	0	0	240
Участок 3	216	0	0	0	24
Участок 4	12	0	132	0	0
Участок 5	0	96	0	144	0
Участок 6	0	240	0	0	0
Участок 7	0	0	72	0	0

Экспериментальная проверка модели

Анализ таблиц 4 и 5 показывает, что для оптимального распределения объемов перевозок по маршрутам затраты времени на перевозки ТКО составляют 126888 машино-часов.

Анализ таблиц 4 и 3 показывает, что для начального распределения объемов перевозок по маршрутам затраты времени на перевозки ТКО составляет 176888 машино-часов.

Таким образом, в рассматриваемом случае предлагаемый метод минимизации затрат времени на перевозки ТКО позволит сэкономить не менее 50 000 машино-часов.



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
РЕГИОНАЛЬНОЙ
ЭКОНОМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

Выводы

Предлагаемая модель позволяет строить оптимальные маршруты для перевозок ТКО с минимальными затратами заданного вида (расходы топлива, затраты времени и др.). Задача решается на графе УДС, содержащем привязанные к ребрам графа данные о затратах, связанных с проездом мусоровозов по соответствующим участкам УДС.

Кроме того, модель позволяет определять оптимальные варианты распределения рейсов мусоровозов между построенными оптимальными маршрутами.

Предлагаемая модель является детерминированной. Однако в реальности основные параметры этой модели измеряются случайными величинами. В частности случайной величиной является время проезда мусоровоза по участкам УДС. Это существенно сужает возможности использования модели при решении практических задач.

Для решения проблем оптимизации перевозок, связанных со случайными значениями времени проезда мусоровозов по участкам УДС, планируется на основе предлагаемой модели построить стохастическую адаптивную модель (Срагович, 1976).



Выводы

В этой модели вместо затрат времени на проезд мусоровозов по участкам УДС предполагается использовать математическое ожидание затрат (Андреев, 2023). Для решения задачи определения математического ожидания этих затрат движение мусоровозов должно рассматриваться в транспортном потоке (Хейт, 1966).



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
РЕГИОНАЛЬНОЙ
ЭКОНОМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

Литература

- Андреев В.А. Оптимизационная модель перевозок твердых коммунальных отходов городской агломерации// Экономика северо-запада: проблемы и перспективы развития. 2023. №1(72). С. 104-110.
- Где в Петербурге и Ленобласти будут строить новые заводы для переработки мусора. URL:<https://www.spb.kp.ru/daily/28365.5/4513866> (дата обращения 10.05.2023).
- Левитин А. Алгоритмы: введение в разработку и анализ. М.: Вильямс, 2006. 576 с.
- Таха Х. Введение в исследование операций (том 1). М.: Мир, 1985. 479 с.
- Срагович В.Г. Теория адаптивных систем. М.: Наука, 1976. 319 с.
- Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков. М.: Мир, 1966. 286 с.
- Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. Задачи и методы линейного программирования. М.: Советское радио, 1961. 365 с.





ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

- При использовании материалов ссылка на настоящий источник обязательна

 (812) 3164865

 190013, г. Санкт-Петербург, ул. Серпуховская, 38

 www.iresras.ru

 <https://vk.com/iresrasru>

 info@iresras.ru