

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 656.073.7

doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-25-34

## АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ СЕТИ ПОЛИГОНОВ СБОРА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Александр Анатольевич Лютоев<sup>1</sup> ✉, Елена Владимировна Хабаева<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия

<sup>1</sup> allyutoev@yandex.ru

<sup>2</sup> ehabaeva@inbox.ru

**Аннотация.** Целью исследования является разработка алгоритма построения сети полигонов для хранения, утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления на территории некоторого региона с учетом образуемой массы ТКО и имеющейся транспортной сети, позволяющего прийти к экономически оптимальному решению. Изложенные в научной литературе математические методы направлены на решение задач определения оптимального места расположения объектов логистической инфраструктуры – производственного предприятия, склада, распределительного центра, торговой точки. В работе сформулирован и реализован алгоритм построения оптимальной сети полигонов, которая обеспечила бы минимальные экономические затраты на логистику, строительство и эксплуатацию полигонов. Основными учитываемыми факторами являются: масса образуемых ТКО, стоимости перевозки от площадки временного накопления до полигона ТКО, расстояния между административными центрами. Основной принцип поиска экстремума логистики основывается на определении главного узла - узел с наибольшей массой ТКО по всем имеющимся дорожным развязкам и выбор местоположения полигона из условия максимальной разности годовых логистических затрат. С помощью предложенного алгоритма решена задача по определению количества и местоположению полигонов ТКО для южной части Республики Коми.

**Ключевые слова:** полигон твердых коммунальных отходов, мощность полигона, логистика, экономическая эффективность, оптимальное решение, маршрутный граф, цепь, узел

**Для цитирования:** Лютоев А.А., Хабаева Е.В. Алгоритм поиска оптимальной сети полигонов сбора твердых коммунальных отходов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №2 (24). С. 25-34. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-25-34.

Original article

Open Access Article

## ALGORITHM FOR SEARCHING FOR AN OPTIMAL NETWORK OF POLYGONS FOR COLLECTING SOLID COMMUNAL WASTE

Alexander A. Lyutoev<sup>1</sup> ✉, Elena V. Khabaeva<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia

<sup>1</sup> allyutoev@yandex.ru

<sup>2</sup> ehabaeva@inbox.ru

**Abstract.** The aim of the study is to develop an algorithm for constructing a network of polygons for storing, recycling and neutralizing industrial and consumer waste in a certain region, taking into account the generated mass of solid communal waste and the existing transport network, allowing one to come to an economically optimal solution. The mathematical methods presented in the scientific literature are aimed at solving problems of determining the optimal location of logistics infrastructure objects, namely a manufacturing plant, a warehouse, a distribution centre, a retail outlet. The paper formulates and implements an algorithm for constructing an optimal network of polygons, which would minimize economic costs for logistics, construction, and operation of the polygons. The main factors taken into account are the mass of generated solid communal waste, the transportation cost from the temporary accumulation site to the solid communal waste polygon, the distance between administrative centres. The basic principle of searching for the logistics extremum is based on determining the main node, that is the one with the largest mass of solid communal waste along all available road junctions and choosing the polygon location based on the condition of the maximum difference in annual logistics costs. Using the proposed algorithm, the paper solves the problem of determining the number and location of solid communal waste polygons for the southern part of the Komi Republic.

**Keywords:** solid communal waste polygons, capacity of the polygon, logistics, economic efficiency, optimal solution, route graph, chain, node

**For citation:** Lyutoev A.A., Khabaeva E.V. Algorithm for Searching for an Optimal Network of Polygons for Collecting Solid Communal Waste. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 2 (24). pp. 25-34. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-25-34.

## Введение

Рост численности населения городов и развитие промышленности в регионах непосредственно влекут за собой увеличение количества образующихся бытовых и промышленных отходов. Неправильный сбор, несвоевременное удаление и неудовлетворительное обезвреживание бытовых и промышленных отходов оказывают негативное воздействие на экологическую обстановку в регионе – наносят экологический ущерб окружающей среде, вызывая загрязнение атмосферного воздуха, почвы, поверхностных и подземных вод.

Одним из национальных проектов, реализуемых в настоящее время на территории РФ, является проект «Экология» (2019 – 2024 гг.), который нацелен на «Создание устойчивой системы обращения с твердыми коммунальными отходами, обеспечивающей сортировку отходов в объеме ста процентов...» [1]. Реализация данного проекта предполагает организацию в каждом регионе РФ полигонов для хранения, утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления, что является важным элементом жизнеобеспечения населения данного региона. Количество и площадь полигонов зависит от численности жителей населённых пунктов, обслуживаемых полигонами, их площади и конфигурации, дальности транспортировки отходов.

В научной литературе описываются различные математические методы и модели, позволяющие определить оптимальное расположение различных объектов инфраструктуры. Среди них можно выделить простые методы (эвристический метод Ардалана, метод центра тяжести, метод пробной точки, метод сетки и т.д.) дающие экспресс оценку, поскольку в их основе лежит большое количество допущений и сложные методы и модели (метод калькуляции затрат, метод начисления баллов, метод аналитической иерархии, методы сетевого моделирования, метод непрерывной и дискретной оптимизации), позволяющие определить более точное решение поставленной задачи [2 – 7].

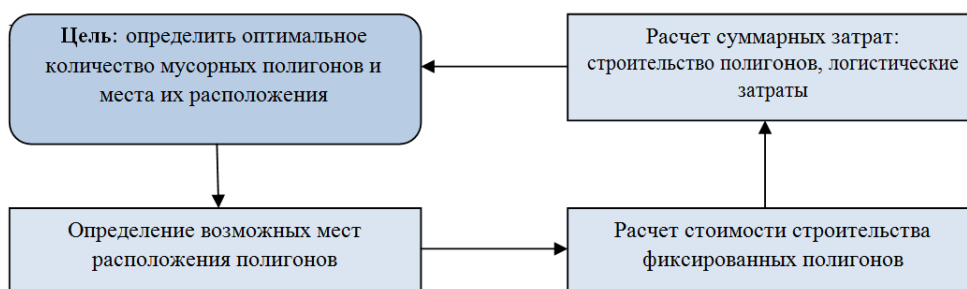
Рассмотренные подходы в большинстве своем применимы для решения задач определения оптимального места расположения объекта логистической инфраструктуры – производственного предприятия, склада, распределительного центра, торговой точки [10 – 16].

## Материалы и методы

Места расположения полигонов определяются на основе анализа ряда факторов: экологических, экономических, социальных [8, 9]. Экономические факторы размещения полигона предполагают затраты на разработку проекта, строительство, функционирование объекта и перевозку отходов. Таким образом, экономические затраты на организацию полигонов для хранения, утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления включают в себя затраты на строительство полигонов, их эксплуатацию и логистику ТКО. Для временного периода  $k$  лет функция затрат может быть представлена в виде  $Z = \sum_{i=1}^n S_i(Q) + k \sum_{i=1}^n E_i(Q) + k \cdot P_n$ ,

где  $S_i(Q)$  – сметная стоимость строительства  $i$ -ого полигона мощностью  $Q$  (т/год);  $E_i(Q)$  – удельная стоимость эксплуатации  $i$ -ого полигона мощностью  $Q$  за один год;  $P_n$  – затраты на логистику ТКО для  $n$  полигонов за один год.

Авторами предлагается методологический подход, позволяющий спроектировать оптимальную сеть мусорных полигонов с учетом таких ключевых факторов, как образуемая в каждом МО масса ТКО и имеющаяся транспортная сеть. Подход предполагает реализацию трех этапов (рис. 1): выбор мест расположения полигонов; расчет стоимости строительства полигонов; построение и расчет оптимального значения целевой функции.



**Рис. 1. Этапы поиска оптимума**  
*Fig. 1. Stages of searching for the optimum*

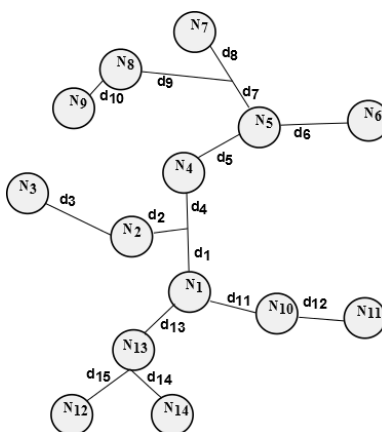
На первом этапе на основе расчета логистических затрат определяются МО, на территории которых целесообразно размещение полигона ТКО. Выбор места расположения очередного  $(j+1)$ -го полигона предлагается осуществлять посредством реализации алгоритма:

1. Разбиение маршрутного графа на цепи (от фиксированных полигонов до листов).
2. Определение в каждой цепи главного узла – узел с наибольшей массой ТКО (потенциальный  $(j+1)$ -ый полигон  $\Pi_{j+1}$ ).
3. Для каждого главного узла
  - 1) создание группы из  $n$  узлов  $N_i$  из условия, что расстояние от  $i$ -ого узла до главного узла  $d \rightarrow \min$ ;
  - 2) прикрепление не присоединённых к этой группе узлов к одному из фиксированных полигонов  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_j$ , исходя из условия, что расстояние от  $i$ -ого узла до полигона  $d \rightarrow \min$ ;
  - 3) расчет годовых логистических затрат для сети полигонов  $\{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_j, \Pi_{j+1}\}$   $P_{j+1}$  на основе данных из табл. 2, 3;
  - 4) расчет экономической эффективности  $P_j - P_{j+1}$ .
4. Выбор среди главных узлов  $j+1$ -ого полигона из условия  $P_j - P_{j+1} \rightarrow \max$ .
5. Проведение итерации по ребрам, исходящим из  $j+1$ -го полигона, с целью уточнения местоположения полигона на основе расчета затрат.

### Постановка задачи

Рассмотрим задачу поиска количества и мест расположения полигонов для сбора, обработки и утилизации ТКО в Республике Коми  $N$ .

Регион  $N$  территориально включает в себя четырнадцать муниципальных образований с административными центрами  $N_i$  (рис. 2).



**Рис. 2. Схема дорожной развязки регион  $N$  (маршрутный граф)**  
*Fig. 2. Road junction diagram region  $N$  (route graph)*

Данные, по каждому МО региона, необходимые для расчётов представлены в таблицах (табл. 1 – 3).

Таблица 1

**Масса ТКО по МО**

Table 1

*Mass of SMW according to MO*

MON <sub>i</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>6</sub>	N <sub>7</sub>	N <sub>8</sub>	N <sub>9</sub>	N <sub>10</sub>	N <sub>11</sub>	N <sub>12</sub>	N <sub>13</sub>	N <sub>14</sub>
Масса ТКО Q <sub>i</sub> , т/год	99044	7270	5144	5880	55220	3109	4128	2814	2309	1641	4639	4129	2982	4184

Стоимость перевозки от площадки временного накопления до полигона 1 м<sup>3</sup> ТКО составляет 1,42 руб/км. Исходя из усредненной величины плотности отходов ТКО 250 кг/м<sup>3</sup> (0,25 т/м<sup>3</sup>), стоимость перевозки одной тонны ТКО составит  $m = 1,42 \cdot 4 = 5,68$  руб/км. На основе данных из табл. 1 произведен расчет затрат на перевозку ТКО по формуле  $p_i = Q_i \cdot m$  (см. табл. 2).

Таблица 2

**Затраты на перевозку ТКО на 1 километр в год по МО (руб/км)**

Table 2

*Costs for transporting SMW per 1 kilometer per year according to MO*

МО N <sub>i</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>6</sub>	N <sub>7</sub>	N <sub>8</sub>	N <sub>9</sub>	N <sub>10</sub>	N <sub>11</sub>	N <sub>12</sub>	N <sub>13</sub>	N <sub>14</sub>
затраты P <sub>i</sub> , руб.	562569,92	41293,60	29217,92	33398,40	313649,60	17659,12	23447,04	15983,52	13115,12	9320,88	26349,52	23452,72	16937,76	23765,12

Таблица 3

**Расстояния от административных центров МО до перекрестков (км)**

Table 3

*Distances from the administrative centers of MO to intersections (km)*

d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>	d <sub>6</sub>	d <sub>7</sub>	d <sub>8</sub>	d <sub>9</sub>	d <sub>10</sub>	d <sub>11</sub>	d <sub>12</sub>	d <sub>13</sub>	d <sub>14</sub>	d <sub>15</sub>
67	27	189	61	190	180	32	178	207	127	47	139	81	104	100

Необходимо найти экономически оптимальное решение поставленной задачи, т.е. определить такое количество и местоположение полигонов, которое обеспечило бы минимальные экономические затраты на логистику, строительство и эксплуатацию полигонов.

**Результаты**

На первом шаге фиксируется место положения одного полигона  $P_1$  в МО с наибольшей годовой массой ТКО, т.е. в окрестности административного центра N<sub>1</sub>. На основе данных из табл. 2, 3 рассчитаны годовые логистические затраты для полигона  $P_1$   $P_1 = 168572914,4$  руб.

Посредством реализации вышеописанного алгоритма определяется место расположения второго полигона  $P_2$ .

Таблица 4

**Расчетные данные для определения места расположения второго полигона**

Table 4

*Calculation data for determining the location of the second polygon*

Главный узел, МО	Общие логистические затраты P <sub>2</sub> , руб.	Экономическая эффективность P <sub>1</sub> – P <sub>2</sub> , руб.
N <sub>2</sub>	145 254 720	23 318 195
N <sub>5</sub>	<b>46 507 215</b>	<b>122 065 699</b>
N <sub>11</sub>	163 671 904	4 901 011
N <sub>12</sub>	164 327 972	4 244 942
N <sub>13</sub>	164 546 294	4 026 620

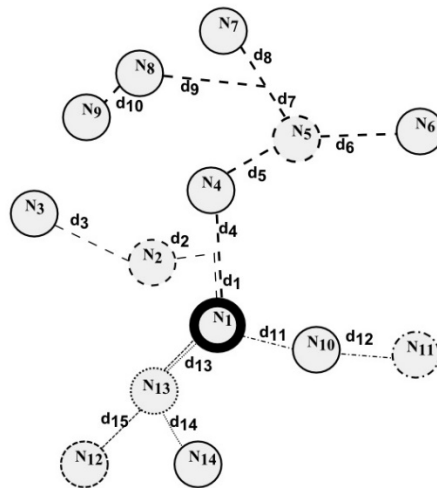


Рис. 3. Разбиение на цепи маршрутного графа, выбор главных узлов  
 Fig. 3. Partitioning the route graph into chains, selecting main nodes

На основании расчетов фиксируется место расположения второго полигона  $P_2$  в окрестности административного центра  $N_5$ . Проводятся итерации по ребрам, исходящим из административных центров  $N_1$  ( $d_1, d_{11}, d_{13}$ ) и  $N_5$  ( $d_5, d_6, d_7$ ) с целью расчета затрат и уточнения места расположения полигонов  $P_1$  и  $P_2$ . На основании проведенных расчетов определяются места положения полигонов (рис. 4).

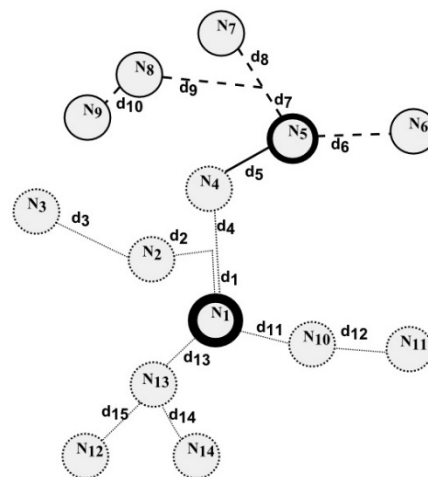


Рис. 4. Маршрутный граф, фиксированные полигоны  $P_1, P_2$   
 Fig. 4. Route graph, fixed polygons  $P_1, P_2$

Привязка МО к фиксированным полигонам  $P_1, P_2$

Таблица 5

Table 5

<i>Binding MO to fixed polygons <math>P_1, P_2</math></i>	
$P_1$ MO $N_1$	$N_1, N_2, N_3, N_4, N_{10}, N_{11}, N_{12}, N_{13}, N_{14}$ Мощность 134 913 т/год
$P_2$ MO $N_5$	$N_5, N_6, N_7, N_8, N_9$ Мощность 67 580 т/год

Наименьшие логистические затраты для двух полигонов  $P_1$  и  $P_2$  составят  $P_2 = 46\,507\,215$  руб.

Посредством реализации алгоритма определяется место расположения третьего полигона  $P_3$ . Для этого на каждой цепи выделены главные узлы (рис. 5).

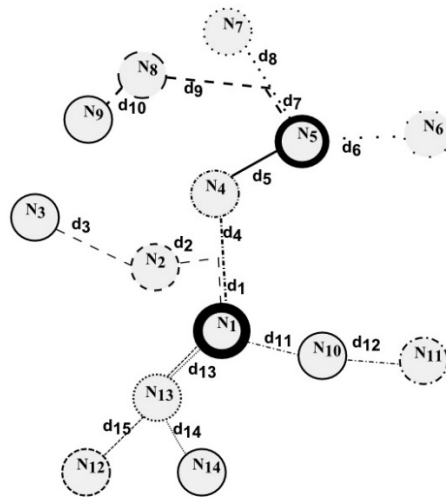


Рис. 5. Разбиение на цепи маршрутного графа, выбор главных узлов  
 Fig. 5. Partitioning the route graph into chains, selecting main nodes

Расчетные данные для определения места расположения третьего полигона

Таблица 6

Table 6

Calculation data for determining the location of the third polygon

Главный узел, МО	Общие логистические затраты $P_3$ , руб.	Экономическая эффективность $P_2 - P_3$ , руб.
$N_2$	38 543 196	7 964 019
$N_4$	41 809 151	4 698 064
$N_6$	43 328 574	3 178 642
$N_7$	41 583 337	4 923 878
$N_8$	39 552 640	6 954 575
$N_{11}$	41 606 204	4 901 011
$N_{12}$	42 262 273	4 244 942
$N_{13}$	42 480 595	4 026 620

На основании расчетов фиксируется место расположения третьего полигона  $\Pi_3$  в окрестности административного центра  $N_2$ . Проводятся итерации по ребрам, исходящим из административных центров  $N_1$  ( $d_1, d_{11}, d_{13}$ ),  $N_5$  ( $d_5, d_6, d_7$ ) и  $N_2$  ( $d_2, d_3$ ) с целью расчета затрат и уточнения места расположения полигонов  $\Pi_1, \Pi_2$  и  $\Pi_3$ . На основании проведенных расчетов определяются места положения полигонов (рис. 6).

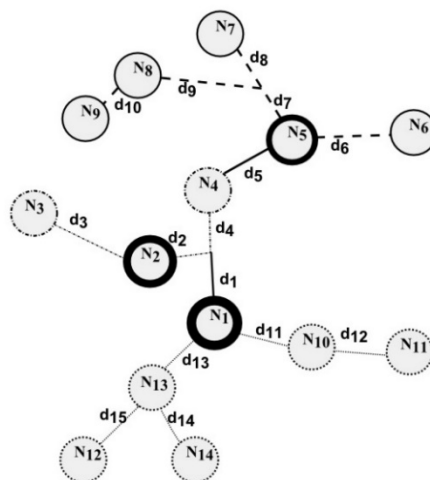


Рис. 6. Маршрутный граф, фиксированные полигоны  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$   
 Fig. 6. Route graph, fixed polygons  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$

Привязка МО к фиксированным полигонам  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$ 

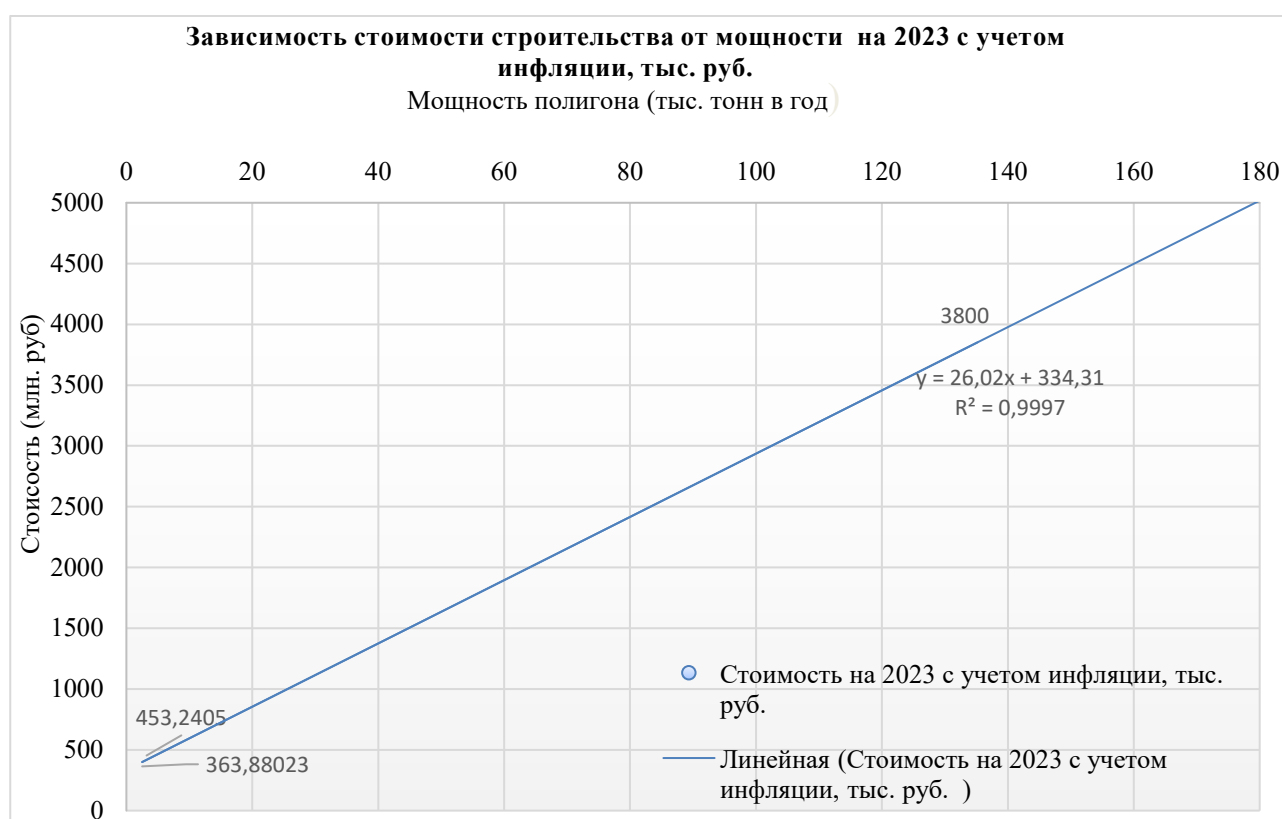
Table 7

<i>Linking MO to fixed polygons <math>\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3</math></i>	
$\Pi_1$ MO $N_1$	$N_1, N_{10}, N_{11}, N_{12}, N_{13}, N_{14}$ Мощность 116 619 т/год
$\Pi_2$ MO $N_5$	$N_5, N_6, N_7, N_8, N_9$ Мощность 67 580 т/год
$\Pi_3$ MO $N_2$	$N_2, N_3, N_4$ Мощность 18 294 т/год

Наименьшие логистические затраты для трех полигонов  $\Pi_1, \Pi_2$  и  $\Pi_3$  составят  $P_3 = 38\,543\,196$  руб.

Посредством последовательной реализации алгоритма, определяется место положения полигонов  $\Pi_4, \Pi_5, \Pi_6$  и  $\Pi_7$ .

На втором этапе решения задачи проведен анализ имеющихся данных о проектной стоимости строительства и мощности ряда полигонов в регионе  $N$  и построена линейная функциональная зависимость стоимости строительства полигона от мощности (рис. 7).



**Рис. 7. Линия тренда стоимости строительства полигона от мощности**  
*Fig. 7. Trend line of landfill construction cost versus capacity*

Найденная функциональная зависимость позволяет рассчитать приближенную стоимость строительства полигона мощностью  $Q_i S_i(Q) = 26020 \cdot Q_i + 334100000$  (табл. 8).

Третий этап решения задачи предполагает построение и расчет оптимального значения целевой функции. Анализируя функцию затрат  $Z = \sum_{i=1}^n S_i(Q) + k \sum_{i=1}^n E_i(Q) + k \cdot P_n$  можно заметить, что сумма удельных стоимостей эксплуатации  $n$  полигонов  $\sum_{i=1}^n E_i(Q)$ , включающая в себя затраты на обработку ТКО внутри полигонов (складирование, прессовка и т.д.), представляет собой величину постоянную для данного региона, определяемую объемом ТКО и не зависящую ни от количества, ни от мест расположения полигонов. Следовательно, эта составляющая не будет оказывать влияние на выбор оптимального решения. Таким образом, в

качестве целевой функции предлагается рассматривать функцию  $Z_1 = \sum_{i=1}^n S_i(Q) + 20P_n$ , описывающую суммарные затраты на строительство полигонов и логистику ТКО на период 20 лет. Данные, полученные на первых двух этапах, позволяют рассчитать значение целевой функции для различного числа полигонов (табл. 9, рис. 8).

Таблица 8

Расчет стоимости строительства полигонов

Table 8

Calculation of the cost of construction of landfills

<b>Один полигон</b>	$\Pi_1$						
Мощность, т/год	202 493						
Стоимость, руб.	5 568 867 860						
<b>Два полигона</b>	$\Pi_1$	$\Pi_2$					
Мощность, т/год	134 913	67 580					
Стоимость, руб.	3 810 436 260	2 058 431 600					
<b>Три полигона</b>	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$				
Мощность, т/год	116 619	67 580	18 294				
Стоимость, руб.	3 334 426 380	2 058 431 600	776 009 880				
<b>Четыре полигона</b>	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_4$			
Мощность, т/год	116 619	62 457	18 294	5 123			
Стоимость, руб.	3 334 426 380	1 925 131 140	776 009 880	433 300 460			
<b>Пять полигонов</b>	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_4$	$\Pi_5$		
Мощность, т/год	116 619	62 457	13 150	5 123	5 144		
Стоимость, руб.	3 334 426 380	1 925 131 140	642 163 000	433 300 460	433 846 880		
<b>Шесть полигонов</b>	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_4$	$\Pi_5$	$\Pi_6$	
Мощность, т/год	116 619	58 329	13 150	5 123	5 144	4 128	
Стоимость, руб.	3 334 426 380	1 817 720 580	642 163 000	433 300 460	433 846 880	407 410 560	
<b>Семь полигонов</b>	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_4$	$\Pi_5$	$\Pi_6$	$\Pi_7$
Мощность, т/год	111 980	58 329	13 150	5 123	5 144	4 128	4 639
Стоимость, руб.	3 213 719 600	1 817 720 580	642 163 000	433 300 460	433 846 880	407 410 560	420 706 780

Таблица 9

Расчет значений целевой функции  $Z_1 = \sum_{i=1}^n S_i(Q) + 20P_n$

Table 9

Calculation of objective function values  $Z_1 = \sum_{i=1}^n S_i(Q) + 20P_n$

Количество полигонов	Стоимость строительства полигонов, руб.	Затраты на логистику в год, руб.	Затраты на логистику, 20 лет, руб.	Суммарные затраты, руб.
1	5 568 867 860	168 572 914,00	3 371 458 280,00	8 940 326 140,00
2	5 868 867 860	46 507 215,00	930 144 300,00	<b>6 799 012 160,00</b>
3	6 168 867 860	38 543 196,00	770 863 920,00	6 939 731 780,00
4	6 468 867 860	31 588 621,00	631 772 420,00	7 100 640 280,00
5	6 768 867 860	26 066 434,00	521 328 680,00	7 290 196 540,00
6	7 068 867 860	21 142 556,00	422 851 120,00	7 491 718 980,00
7	7 368 867 860	16 241 545,00	324 830 900,00	7 693 698 760,00



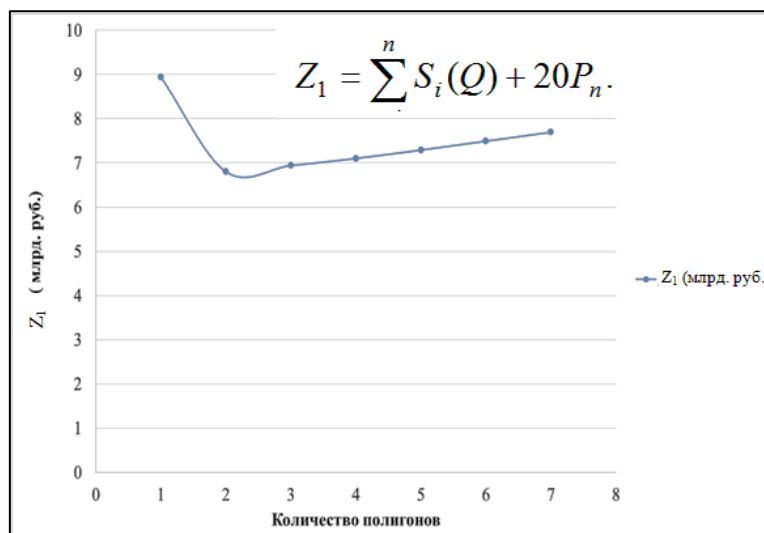


Рис. 8. Зависимость суммарных затрат от количества полигонов (срок эксплуатации 20 лет)  
 Fig. 7. Dependence of total costs on the number of landfills (operation life 20 years)

Минимальные суммарные затраты составят  $Z_1 = 6\,799\,012\,160$  руб., в том числе затраты на строительство полигонов  $S_1(134\,913) + S_2(67\,580) = 5\,868\,867\,860$  руб. и затраты на логистику  $TKO\ 20 \cdot P_2 = 20 \cdot 46\,507\,215 = 930\,144\,300$  руб.

### Заключение

В заключение следует отметить, что разработанный алгоритм позволяет избежать многократных итераций при поиске оптимального значения в обратном направлении, в виду высокой проектной стоимости строительства полигона. Проведенные расчеты дали возможность сформулировать оптимальное решение – строительство полигонов для хранения, утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления в двух муниципальных округах МО Республики Коми, что обеспечит минимальные экономические затраты на строительство, эксплуатацию полигонов и логистику ТКО.

### Список источников:

1. Национальный проект «Экология»: [Электронный ресурс]. URL: <https://ecologyofrussia.ru/proekt>. (Дата обращения: 16.01.2024).
2. Соколов А.В., Юков В.В. Методы оптимальных решений. В 2 томах. Том 1. Общие положения. Математическое программирование и моделирование. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 564 с.
3. Машунин Ю.К. Теория и методы принятия оптимальных решений по множеству критериев в инженерных системах : монография. – М.: РУСАЙНС, 2023. – 340 с.
4. Нефедов Д.Г. Математические модели и методы решения задач оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры: специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нефедов Денис Геннадьевич; Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова. – Челябинск. – 2015. – 120 с.
5. Чернышев С.В. Модели, методы и алгоритмы эффективного решения задачи маршрутизации транспорта на графах больших размерностей : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Чернышев Сергей Владленович; Нац. исслед. ун-т "Высш. шк. экономики". – М.: 2011. – 116 с.

### References:

1. National Project "Ecology" [Internet] [cited 2024 Jan 16]. Available from: <https://ecologyofrussia.ru/proekt>
2. Sokolov A.V., Yukov V.V. Methods of the Best Solutions. Volume 1. General Provisions. Mathematical Programming and Modeling. Moscow: Fizmatlit; 2014.
3. Mashunin Yu.K. Theory and Methods of Making Optimal Decisions Based on Multiple Criteria in Engineering Systems. Moscow: Ruscience; 2023.
4. Nefedov D.G. Mathematical Models and Methods for Solving Problems of Optimal Placement of Elements of a Distributed Production Structure. Candidate's Thesis in Technical Sciences. Chelyabinsk: Kalashnikov Izhevsk State Technical University; 2015.
5. Chernyshev S.V. Models, Methods, and Algorithms for Effectively Solving the Problem of Transport Routing on Large-Dimensional Graphs. Candidate's Thesis in Physics and Mathematics. Moscow: Higher School of Economics; 2011.

6. Просветов Г.И. Математические методы в логистике. Задачи и решения. – М.: «Альфа-Пресс». – 2008. – 304 с.

7. Зайнуллина, Э. Ш. Модели и методы решения задачи оптимальной маршрутизации данных в корпоративных сетях : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Зайнуллина Эльмира Шаукатовна; Казан. гос. техн. ун-т им. А.Н. Туполева.- Казань, 2008.- 119 с.

8. СП 320.1325800.2017 ПОЛИГОНЫ ДЛЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ. Проектирование, эксплуатация и рекультивация

9. СП 2.1.7.1038-01 Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для ТБО

10. Кириллов А.В., Цепин В.Е. Модель построения сети дистрибуции на основе многофакторного анализа промышленно-логистического потенциала регионов // Экономика региона. – 2015. – №4. – С. 336-345.

11. Попов П.В., Мирецкий И.Ю. Методология построения логистической инфраструктуры на территории региона // Экономика региона. – 2019. – Т. 15. – №2. – С. 483-492.

12. Гаджинский А.М. Выбор места расположения склада // Справочник экономиста. – 2004. – №8.

13. Бухаров Д.С. Определение оптимального количества и расположения логистических центров. Математическая модель и численный метод // Вестник ИрГТУ. – 2012. – №4 (63). – С. 8-14.

14. Дианов С.В., Калашников К.Н., Ригин В.А. Поиск путей оптимального пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения: обзор методического инструментария // Проблемы развития территории. – 2021. – Т. 25. – № 2. – С. 108-127.

15. Москвичев О.В., Леонова С.А. Методика выбора мест размещения транспортно-пересадочных узлов на основе оптимизационной математической модели // Мир транспорта. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 198-213.

16. Дулесов А.С., Прутовых М.А. Методика решения задачи об оптимальном размещении производственных объектов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 151-158.

6. Prosvetov G.I. Mathematical Methods in Logistics. Problems and Solutions. Moscow: Alfa-Press; 2008.

7. Zainullina E.Sh. Models and Methods for Solving the Problem of Optimal Data Routing in Corporate Networks. Candidate's Thesis in Physics and Mathematics. Kazan: National Research Technical University Named After A.N. Tupolev; 2008.

8. Code 320.1325800.2017. Polygons for Solid Communal Waste. Projecting, Operation and Reclamation.

9. Code 2.1.7.1038-01 Hygienic Requirements for the Arrangement and Maintenance of Solid Domestic Waste Disposal Sites.

10. Kirillov A.V., Tsepin V.E. Model for Building a Distribution Network Based on the Multivariate Analysis of the Industrial and Logistical Potential of Regions. Economy of Regions. 2015;4:336-345.

11. Popov P.V., Miretsky I.Yu. Methodology for Constructing the Region's Logistics Infrastructure. Economy of Regions. 2019;15(2):483-492.

12. Gadzhinsky A.M. Choosing a Warehouse Location. Economist's Handbook. 2004;8.

13. Bukharov D.S. Determination of Optimal Number and Location of Logistics Centres: Mathematical Model And Numerical Method. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2012;4(63):8-14.

14. Dianov S.V., Kalashnikov K.N., Rigin V.A. Search for Ways of Optimal Spatial Placement of Healthcare Infrastructure Facilities: a Review of Methodological Tools. Problems of Territory's Development. 2021;25(2):108-127.

15. Moskvichev O.V., Leonova S.A. Methodology of Selection of Transport Interchange Hubs Location Based on Optimization Mathematical Model. World of Transport and Transportation. 2020;18(2):198-213.

16. Dulesov A.S., Prutovykh M.A. The Method of Task's Solution About Optimum Siting of Production Objects. Modern Problems of Science and Education. 2013;5:151-158.

#### Информация об авторах:

**Лютоев Александр Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры Физики и высшей математики Ухтинского государственного технического университета

**Хабеева Елена Владимировна**

старший преподаватель кафедры Физики и высшей математики Ухтинского государственного технического университета

#### Information about the authors:

**Lyutoev Alexander Anatolyevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Physics and Higher Mathematics" of Ukhta State Technical University

**Khabaeva Elena Vladimirovna**

Senior Lecturer of the Department "Physics and Higher Mathematics" of Ukhta State Technical University

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 07.02.2024; одобрена после рецензирования 20.02.2024; принята к публикации 28.02.2024.**

**The article was submitted 07.02.2024; approved after reviewing 20.02.2024; accepted for publication 28.02.2024.**

**Рецензент** – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

**Reviewer** – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.