

УДК 004.942

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Гагарина Л.Г., Лупин С.С., Портнов Е.М.

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, e-mail: sergeylupin.jr@gmail.com*

В настоящее время актуальной является проблема повышения эффективности принятия решений в области управления твердыми бытовыми отходами для крупных промышленных объектов и городской инфраструктуры, а прогнозирование технических, экономических и экологических рисков при реализации сценариев развития системы управления ТБО. В данной предметной области было проведено значительное количество исследований как отечественными, так и зарубежными специалистами. Однако все они носят узкоспециализированный характер, рассчитаны на определенный город или регион, слабо формализованы и в них отсутствует масштабируемость модели. Для решения поставленной задачи в статье предложена имитационная модель управления процессами утилизации ТБО для исследования и сценарной оценки эффективности стратегий обращения с ТБО, прогнозирования технико-экологического и эколого-экономического риска в средне- и долгосрочной перспективе. Имитационная модель управления ТБО включает такие уровни, как образование, сбор, вывоз и утилизацию отходов. В основе модели схема комплексного управления ТБО по критериям экологической безопасности, ресурсо- и энергосбережения, предложенная Л.Я. Шубовым. Данная схема отвечает критериям иерархии обращения с отходами и включает основные технологические решения в сфере обращения с ТБО, существующие на данное время. Входные параметры имитационной модели задают стратегию управления ТБО. Выходные параметры позволяют дать оценку эффективности стратегии. По результатам проведения имитационного моделирования была выбрана рациональная стратегия управления процессами утилизации твердых бытовых отходов.

**Ключевые слова:** система управления, твердые бытовые отходы, имитационное моделирование, стратегия

## MODELING OF SOLID WASTE MANAGEMENT SYSTEM

Gagarina L.G., Lupin S.S., Portnov E.M.

*National Research University of Electronic Technology, Moscow, e-mail: sergeylupin.jr@gmail.com*

Currently, the urgent problem is to increase the efficiency of decision-making in the field of municipal solid waste management for large industrial facilities and urban infrastructure, and the forecasting of technical, economic and environmental risks in implementing scenarios for the development of solid waste management systems. In this subject area, a significant amount of research has been conducted by both domestic and foreign experts. However, all of them are of a highly specialized nature, designed for a specific city or region, poorly formalized, and there is no scalability of the model. To solve this problem, the article proposes a simulation model for managing solid waste disposal processes for research and scenario assessment of the effectiveness of solid waste management strategies, forecasting the technical, environmental and environmental-economic risk in the medium and long term. The solid waste management model includes such levels as generation, collection, removal and disposal of waste. The model is based on the scheme of integrated MSW management according to the criteria of environmental safety, resource and energy conservation, proposed by L. Shubov. This scheme meets the criteria of the waste management hierarchy and includes the main technological solutions in the field of solid waste management that currently exist. The input parameters of the simulation model determine the strategy of solid waste management. The output parameters allow you to evaluate the effectiveness of the strategy. Based on the results of simulation, a rational strategy for the management of solid waste management was selected.

**Keywords:** modeling, control system, municipal solid waste, simulation modeling

В настоящее время наблюдается устойчивый рост промышленного производства, развитие транспортной и городской инфраструктуры, что в конечном итоге приводит к повышенной экологической нагрузке на окружающую среду. Одним из наиболее неблагоприятных факторов, связанных с хозяйственно-экономической деятельностью человека, является увеличение объемов производимых твердых бытовых отходов. Нерешенные к настоящему времени проблемы, связанные с утилизацией ТБО, имеют как экологические, так и экономические негативные последствия [1, 2].

Одним из способов решения данной проблемы является непрерывная информационная поддержка системы управления твердыми бытовыми отходами (ТБО), которая включает как процессы сбора и вывоза ТБО, так и процессы подготовки к использованию утильных компонентов и уничтожению или захоронением неиспользуемых фракций [3].

Цель исследования: разработка модели управления процессами утилизации твердых бытовых отходов и проведении исследований эффективности сценариев управления ТБО, которые задаются с помощью созданной имитационной модели.

## Материалы и методы исследования

В работе были проанализированы основные методы и средства управления процессами сбора, транспортировки и утилизации ТБО.

На данный момент существует целый ряд программных решений для прогнозирования и оценки целесообразности мер, принятых в сфере управления сбором, транспортировкой и утилизацией ТБО [4]. В частности, Э. Антман [5] в своем исследовании рассматривает модель управления ТБО, включающую следующие этапы: транспортировка; сортировка; утилизация. Фреймворк состоит из трех основных компонентов: БД, модуль оценки основных параметров системы и модуль оптимизации. На основе представленных характеристик проводится выполнение сценариев работы системы обращения с ТБО и оптимизация.

Одним из ключевых этапов исследования Э. Антмана является задача оптимизации. Автор выделяет девять типов ТБО, обозначаемых  $i \in I = \{0, 1, \dots, 9\}$  и также характеризующихся объемом  $q_i$ . Каждый центр утилизации ТБО обозначен множествами  $j \in \{0 \dots J\}$ ,  $k \in \{0 \dots K\}$ ,  $p \in \{0 \dots P\}$  соответственно. Основная задача – определить сценарий работы системы, при котором достигается минимальная стоимость утилизации ТБО. Общая стоимость переработки ТБО рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_1 = \min(TC) = C_c + C_r + C_t + C_p + C_d + C_m - G, \quad (1)$$

$$C_r = \sum_{i \in I} \sum_j \sum_i C_{ij}^{Coll} X_{ijt}, \quad (2)$$

$$C_r = \sum_{i \in I} \sum_{k=j+1}^{22} \sum_i C_{ij}^{Trans} X_{ijt}, \quad (3)$$

$$C_p = \sum_{j=1}^{22} C_j^{Proc} y_j, \quad (4)$$

$$C_d = \sum_{i \in I} \sum_{l=1}^{14} \sum_{i=1}^{22} C_{jl}^{Disch} z_{jlt}, \quad (5)$$

где  $C_c, C_r, C_p, C_d, C_m$  – стоимость организации, сбора, транспортировки, обработки, утилизации и обслуживания соответственно;  $C_{ij}^{Coll}$ ,  $C_{ij}^{Trans}$ ,  $C_j^{Proc}$ ,  $C_{ij}^{Disch}$  – стоимость сбора, транспортировки, обработки и утилизации за единицу времени;  $l \in \{0 \dots 14\}$  – тип вторичного сырья.

Основным преимуществом данного фреймворка является достаточно полное описание модели системы обращения с ТБО с учетом наиболее значимых факторов. Однако очевидным недостатком фреймворка является ограниченность его применения. Система была реализована на примере штата Флориды и схема размещения объектов утилизации и сбора жестко привязана к данному региону. Адаптация фреймворка под цели и задачи принятия решения применительно к другим регионам с совершенно другой схемой размещения объектов и плана утилизации ТБО является трудновыполнимой.

В целом все известные модели характеризуются узкой направленностью и не могут использоваться для описания абстрактного объекта [6, 7], в связи

с чем в работе предложена модель, которая направлена на устранение указанных недостатков

Разработанная обобщенная процессная модель системы управления ТБО представлена на рис. 1. От источника сбора твердые бытовые отходы направляются в один из выбираемых объектов утилизации, согласно маршруту транспортировки, который задается в соответствии с условиями, поставленными пользователем перед запуском модели. Маршрут транспортировки учитывает количество объектов утилизации каждого типа и их приоритет [8].

Отвал (остаточная часть ТБО, полученная в результате сортировки грязных отходов) транспортируется либо на полигон, либо на МСЗ.

Полигон имеет ряд параметров: время жизни полигона; количество полигонов и среднее расстояние от источника сбора до полигона.

В соответствии с представленной на рис. 1 моделью ТБО транспортируется с мусороперегрузочных станций на мусоросортировочную станцию или на один из объектов утилизации. Он также включает в себя такие маршруты, описывающие дальнейшую транспортировку хвостов утилизации: с мусоросортировочной станции на полигон или МСЗ, с МСЗ на полигон.

Запуск имитационной модели системы управления ТБО осуществляется из внешнего Java-приложения [9]. Количество стратегий обращения с ТБО –  $n$ , задается пользователем. При запуске модели входные для нее параметры инициализируются из базы данных, либо пользователь самостоятельно задает начальные значения (осуществляется посредством интерфейса имитационной модели). Для каждого сценария вычисляется результирующий набор параметров системы: оценка нагрузки на экосистему, количество ТБО, собранных на каждом объекте утилизации, время простоев МСЗ и МС, количество собранного вторичного сырья и т.д. (наиболее подробно параметры описаны в предыдущем пункте), и экспортируется в базу данных. После прогона заданного количества сценариев на основе входных и выходных данных осуществляется поиск множества эффективных сценариев системы управления процессами жизненного цикла твердых бытовых отходов.

Также необходимо учесть то, как пользователь взаимодействует с программой. Важно принять во внимание исходные требования и постановку задачи. Для отображения доступной функциональности программы на рис. 2 представлена UML диаграмма прецедентов.

С одной стороны, диаграмма включает имитационную модель. С другой стороны диаграмма включает внешнее приложение. А прецеденты в рамках имитационной модели включают следующее:

- Запуск имитационной модели. Действие представляет открытие формы, запускающую имитационную модель. Также она включает в себя установки начальных параметров и скорость моделирования.
- Пауза в процессе моделирования.
- Просмотр поведения моделируемой системы, а также динамики изменения параметров модели.

Процесс имитационного моделирования направлен на решение задачи нахождения минимальной стоимости транспортировки ТБО.

Переменными величинами в данной задаче являются  $x_{ij}$ , где  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$  – объемы перевозок от  $i$ -го поставщика, в данном случае источника

ТБО, каждому  $j$ -му потребителю, объекту утилизации,  $m$  и  $n$  – количество МС и объектов утилизации соответственно. Эти переменные могут быть записаны в виде матрицы перевозок:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & & x_{nm} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Так как произведение  $C_{ij}x_{ij}$  определяет затраты на перевозку груза от  $i$ -го источника ТБО  $j$ -му объекту утилизации, то суммарные затраты на перевозку всех грузов равны

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij}x_{ij}. \quad (7)$$

По условию задачи требуется обеспечить минимум суммарных затрат. Следовательно, целевая функция задачи имеет вид

$$f_1(\bar{x}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij}x_{ij} \rightarrow \min. \quad (8)$$

Система ограничений задачи состоит из двух групп уравнений. Первая группа из  $n$  уравнений описывает тот факт, что запасы всех  $n$  МС вывозятся полностью, и имеет вид

$$\sum_{j=1}^m C_{ij}x_{ij} = a_i, i = \overline{1, \dots, n}. \quad (9)$$

Вторая группа из  $m$  уравнений выражает требование удовлетворить запросы всех  $m$  потребителей, т.е. объектов утилизации, полностью и имеет вид

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = b_j, i = \overline{1, \dots, m}. \quad (10)$$

Учитывая условие неотрицательности объемов перевозок, имеем

$$x_{ij} \geq 0, i = \overline{1, \dots, n}, j = \overline{1, \dots, m}. \quad (11)$$

Также необходимо принять во внимание, что количество отходов, перевозимых от сортировочной станции на МСЗ и полигон, должно быть меньше, чем количество отходов, перевозимых от мест сбора и вывоза отходов на станции сортировки:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 0, \quad (12)$$

$$-R \sum_{k=1}^l x_{ij} + \sum_{j=1}^m x_{ij} = 0, \quad (13)$$

где  $R$  – процент ТБО, получаемый в результате сортировки,  $l$  – число МС.

Вторая целевая функция описывает экологические риски в системе управления ТБО. Множитель  $E_i x_i$  определяет влияние на окружающую среду, оказываемое  $i$ -м объектом при утилизации отходов количеством  $x_i$ .

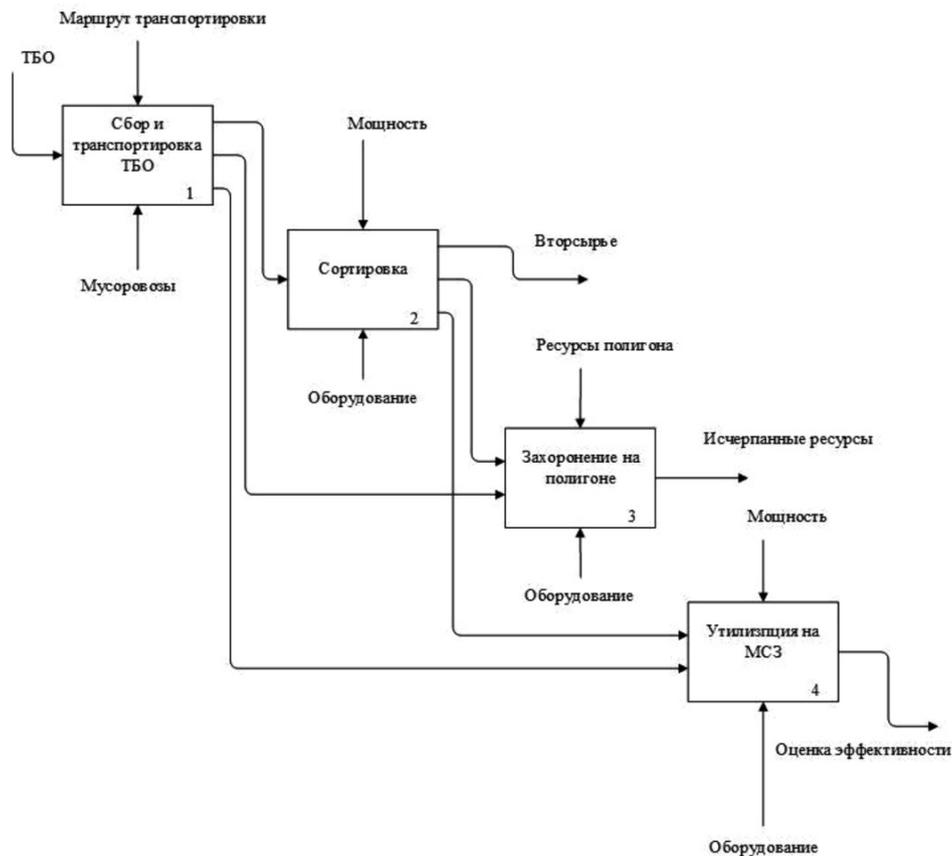


Рис. 1. Обобщенная процессная модель управления ТБО

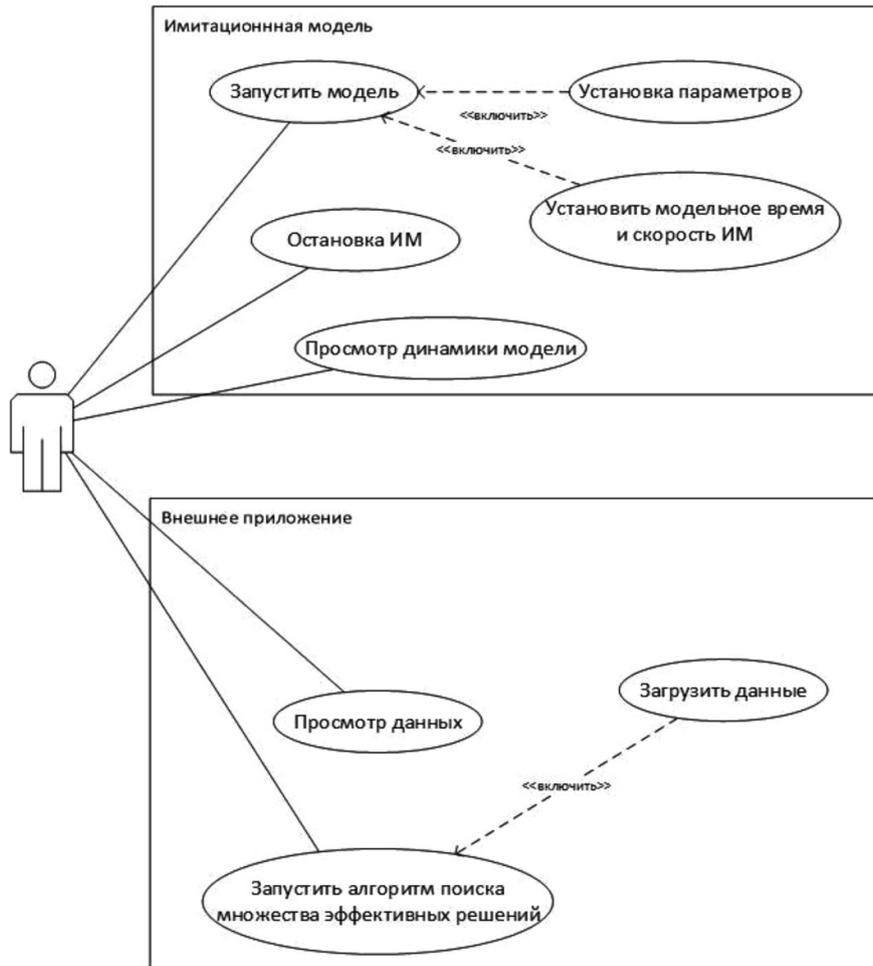


Рис. 2. UML диаграмма прецедентов

Таким образом, функция записывается следующим образом:

$$f_2(\bar{x}) = \sum_{i=1}^m E_i x_i \rightarrow \min. \quad (14)$$

В итоге, совокупность свойств моделируемой системы управления ТБО описывается множеством целевых функций:

$$f(\bar{x}) = \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x})\}, \quad (15)$$

где  $f_1(\bar{x})$  – функция, описывающая параметры системы, формирующие общую стоимость утилизации;  $f_2(\bar{x})$  – функция, описывающая нагрузку на экосистему, вызванную объектом утилизации по сжиганию ТБО;  $\bar{x} = \{x_{ij}\}$  – заданное множество допустимых альтернатив, представленных объемом ТБО, транспортируемых от  $i$ -го источника отходов на  $j$ -й объект утилизации;  $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m, m$  и  $n$  – количество источников и объектов утилизации соответственно.

Множество эффективных сценариев управления ТБО может быть построено в соответствии с принципом Парето.

Алгоритм определения множества Парето состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Определение текущего набора Парето-оптимальных решений:  $P_f(\bar{x}) = \bar{x}$ .

Шаг 2. Если  $x^i \leq x^j$ , то шаг 3. В другом случае шаг 5.

Шаг 3. Элемент  $x^i$  исключается из  $P_f(\bar{x})$ .

Шаг 4. Проверить, что множество не пусто. Если это так, то следующий шаг является шагом 7. В другом случае необходимо установить  $j = j + 1$  и вернуться к шагу 2.

Шаг 5. Если  $x^i \leq x^j$ , то вернуться к шагу 4.

Шаг 6. Исключить  $x^i$  из множества  $P_f(\bar{x})$ .

Шаг 7. Проверить, что множество  $P_f(\bar{x})$  не пусто. Если это так, то установить  $i = i + 1$ , а  $j = j + 1$  и вернуться к шагу 2. В противном случае множество Парето построено.

Схема алгоритма поиска множества эффективных решений представлена на рис. 3.

Для реализации описанного алгоритма написаны классы Optimization и Alternative. Класс Alternative содержит такие поля, как экономические показатели и экологические показатели нагрузки на окружающую среду. В общем виде он описывает ситуацию, в исходном наборе  $P_f(\bar{x})$ . Класс Optimization содержит методы, которые позволяют построить множество Парето.

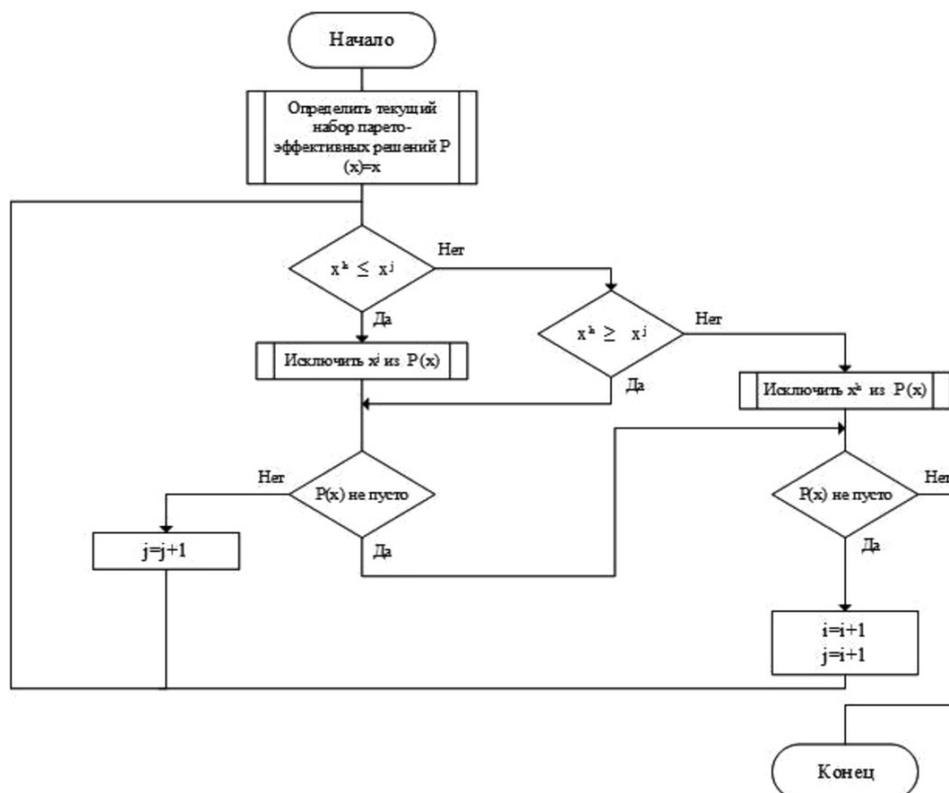


Рис. 3. Схема алгоритма поиска множества эффективных решений

### Результаты исследования и их обсуждение

Для верификации алгоритмов системы поддержки принятия решений были рассмотрены три различные стратегии управления ТБО.

Первая стратегия предусматривает сжигание большей части образуемых отходов. Данная стратегия рассматривалась как один из путей утилизации ТБО в сфере обращения с ТБО в Москве. Однако было обосновано, что сжигание всей образующейся массы неподготовленных отходов представляет собой самый затратный и экологически опасный вариант технологического решения [10].

Вторая стратегия представляет собой комплексный подход к утилизации отходов. В качестве вторичных материальных ресурсов в Европе используют 40–65% ТБО, сжигают с утилизацией энергии 23–35% ТБО, захоранивают в среднем 10–15% ТБО [11].

Третья стратегия описывает систему управления ТБО, существующую в России на нынешний день в Москве и Московской области. На данный момент 80% ТБО вывозится на полигоны захоронения, а осталь-

ная часть либо сжигается, либо отправляется на «ручную сортировку».

Результаты экспериментов представлены в таблице.

Во всех стратегиях мощность объектов утилизации была задана одной и той же. Экономические затраты и экологические риски, необходимые на транспортировку и утилизацию ТБО, рассчитывались с использованием статистических данных. Экономические риски учитывали большой объем обедненных кислородом отходящих газов (5–6 тыс. м<sup>3</sup> на 1 т сжигаемых отходов); дымовые газы содержат всего 8% кислорода и более 10% углекислого газа. На основе полученных данных было установлено, что эффективной стратегией, безусловно, является вторая стратегия управления ТБО.

### Выводы

В работе предложена модель системы управления процессами утилизации твердых бытовых отходов, которая включает следующие основные компоненты: место сбора и вывоза ТБО; транспортное средство (ТС), осуществляющее вывоз ТБО; мусоросжигающий завод; полигон захоронения ТБО; мусорная станция; место обслуживания ТС.

## Результаты имитационного моделирования системы управления ТБО

Параметры	Первая стратегия			Вторая стратегия			Третья стратегия		
	МСЗ	МС	Полигон	МСЗ	МС	Полигон	МСЗ	МС	Полигон
Распределение потока ТБО	0,8	0,1	0,1	0,3	0,4	0,3	0,2	0,1	0,8
Автоматизированная сортировка	+			+			–		
Селективный сбор	+			+			–		
Мощность объекта утилизации *, т/год	80000	50000	15 лет	80000	5000	15 лет	80000	50000	15 лет
Время простоев, дней	11	291	–	91	119	–	267	305	–
Расстояние до объекта утилизации, км	–	–	50	–	–	50	–	–	50
Стоимость сбора, вывоза и утилизации ТБО, руб.	105 млн			60 млн			232 млн		
Объем дымовых газов, м <sup>3</sup>	13x10 <sup>9</sup>			6x10 <sup>8</sup>			18x10 <sup>6</sup>		

Процесс верификации модели и алгоритмов системы поддержки принятия решений для управления ТБО подтвердил достоверность полученных результатов. Уровень статистической значимости результатов принят 0,05. Эффективность разработанной модели подтверждена серией вычислительных экспериментов с широким спектром входных параметров, инициализируемых на основе статистических данных, собранных на примере реальных систем, действующих в мире. Исследована эффективность сценариев управления ТБО на основе трех основных стратегий обращения с ТБО.

Данная работа может быть продолжена в следующих направлениях:

– Уровень сбора ТБО в имитационной модели может быть расширен путем добавления мусороперегрузочных станций и контейнеров;

– Экологические риски захоронения ТБО и сжигания ТБО могут быть дополнены. Следует рассмотреть также морфологический состав отходов.

– Точность пробега транспортных средств можно повысить путем разработки модели, соответствующей карте местности.

*Работа выполнена в рамках финансирования РФФИ (номер договора 18-07-00079\19).*

## Список литературы

1. Еремина М.Г., Савиных В.В. Управление системой обращения с твердыми бытовыми отходами в регионе // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 1 (59). С. 225–233.

2. Талаева О.В. Оптимизация системы обращения с ТКО на территории городских поселений // Наука без границ. 2019. № 9 (37). С. 45–50.

3. Лупин С.С. Проблемы информационной поддержки систем управления утилизацией отходов предприятия // Научное обеспечение технического и технологического прогресса: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции (08 ноября 2018 г.). Стерлитамак: АМИ, 2018. 101 с. С. 34–36.

4. Cremiato R., Mastellone M.L., Tagliaferri C., Zaccariello L., Lettieri P. Environmental impact of municipal solid waste management using Life Cycle Assessment: The effect of anaerobic digestion, materials recovery and secondary fuels production. *Renewable Energy*. 2018. Т. 124. P. 180–188.

5. Antmann E.D., Celik N., Shi X., Dai Y. Simulation-based optimization of solid waste management and recycling programs. IIE Annual Conference. Proceedings. Institute of Industrial and Systems Engineers (IIE). 2012. P. 759–768.

6. Карабалаева С.Б. The problem of municipal solid waste emissions into the environment and the ways of the legal regulation by the example of Japan // Известия ВУЗов (Кыргызстан). 2014. № 11. С. 189–191.

7. Xu F., Li Y., Wang Z.W., Tang L. Mathematical modeling of solid-state anaerobic digestion system for bioenergy production and waste management. American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2014, ASABE 2014 2014. P. 3910–3922.

8. Гагарина Л.Г., Лупин С.С. Классификация промышленных отходов как основа инфологической модели системы управления их переработкой и утилизацией // Известия тульского государственного университета: Технические науки. Выпуск 12. Тула: Издательство ТулГУ, 2018. 611 с. С. 300–307.

9. Гагарина Л.Г., Кавтарадзе Д.Н., Дорогов В.Г., Дорогова Е.Г., Коробкин М.Н. Моделирование процесса принятия решений // Твердые бытовые отходы. 2013. № 1. С. 38–40.

10. Алексахина В.В., Карташова К.К. Проблемы твердых бытовых отходов (ТБО) в мегаполисе (на примере Москвы) // Экология урбанизированных территорий. 2014. № 4. С. 59–67.

11. Шубов Л.Я., Борисова О.Н., Юдин А.Г., Гречишкин В.С. Принципы Zero Waste: Современное прочтение // Твердые бытовые отходы. 2013. № 6 (84). С. 8–13.