УДК 330.46 + 338.001.36
DOI 10.25205/2542-0429-2021-21-1-72-85

Проблемы учета экологической и экономической эффективности при моделировании сферы обращения с твердыми коммунальными отходами

Н. С. Рогачев [1], В. М. Гильмундинов [1, 2]

[1] *Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН*
Новосибирск, Россия

[2] *Новосибирский национальный исследовательский государственный университет*
Новосибирск, Россия

Аннотация

Статья посвящена проблемам развития инструментальных подходов к моделированию сферы обращения с твердыми коммунальными отходами. Целью исследования является разработка концепции совместного учета экономической и экологической эффективности функционирования сферы обращения с твердыми коммунальными отходами при построении экономико-математических моделей. Проведенное обобщение мирового опыта позволило выявить недостаточную проработанность данных вопросов, определить степень ограниченности существующих подходов для целей прикладного моделирования данной сферы, а также выявить их основные сильные и слабые стороны. С целью преодоления указанных проблем разработана концептуальная модель функционирования региональной сферы обращения с твердыми коммунальными отходами, основанная на синтезе межотраслевого и агентского подходов. Показана ее перспективность для дальнейшего развития существующих подходов к экономико-математическому моделированию данной сферы в направлении более полного и одновременного учета указанных аспектов эффективности, особенностей поведения и основных взаимосвязей хозяйствующих субъектов, а также мер государственной экологической политики.

Ключевые слова

твердые коммунальные отходы, экономическая эффективность, экологическая эффективность, моделирование, переработка отходов, обращение с отходами, цикличная экономика

Источник финансирования

Статья подготовлена по результатам исследования, проводимого при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Социально-экономическое развитие Азиатской России на основе синергии транспортной доступности, системных знаний о природно-ресурсном потенциале, расширяющегося пространства межрегиональных взаимодействий», соглашение № 075-15-2020-804 от 02.10.2020

Для цитирования

Рогачев Н. С., Гильмундинов В. М. Проблемы учета экологической и экономической эффективности при моделировании сферы обращения с твердыми коммунальными отходами // Мир экономики и управления. 2021. Т. 21, № 1. С. 72–85. DOI 10.25205/2542-0429-2021-21-1-72-85

© Н. С. Рогачев, В. М. Гильмундинов, 2021

Problems of Accounting the Environmental and Economic Efficiency when Modeling the Sphere of Municipal Solid Waste Management

N. S. Rogachev [1], **V. M. Gilmundinov** [1, 2]

[1] *Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS*
Novosibirsk, Russian Federation

[2] *Novosibirsk State University*
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to the problems of the development of instrumental approaches to modeling of the municipal solid waste management system. A main purpose of the study is to develop a concept for joint accounting of the economic and environmental efficiency of the functioning of the municipal solid waste management system in the construction of economic and mathematical models. The generalization of world experience allows us to identify the insufficient elaboration of these issues. It allows also to determine the degree of limitations of existing approaches for the purposes of applied modeling of this area, as well as to identify their main strengths and weaknesses. In order to overcome these problems, a conceptual model of the functioning of the regional municipal solid waste management system has been developed, based on the synthesis of intersectoral and agency approaches. It is shown that it is promising for the further development of existing approaches to economic and mathematical modeling of this area in the direction of a more complete and simultaneous consideration of these aspects of efficiency, behavioral features and the main interrelationships of economic entities, as well as measures of state environmental policy.

Keywords

municipal solid waste, economic and environmental efficiency, model, recycling, waste treatment, circular economy

Funding

This study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of project “Socio-Economic Development of Asian Russia on the Basis of Synergy of Transport Accessibility, System Knowledge of the Natural Resource Potential, Expanding Space of Inter-Regional Interactions”, agreement no. 075-15-2020-804 dated 02.10.2020

For citation

Rogachev N. S., Gilmundinov V. M. Problems of Accounting the Environmental and Economic Efficiency when Modeling the Sphere of Municipal Solid Waste Management. *World of Economics and Management*, 2021, vol. 21, no. 1, p. 72–85. (in Russ.) DOI 10.25205/2542-0429-2021-21-1-72-85

Согласно данным Всемирного банка, в настоящее время в мире ежегодно образуется около 2 млрд тонн твердых коммунальных отходов (ТКО), причем к 2050 г. ожидается более чем полуторакратное увеличение данного показателя – до 3,4 млрд тонн [1]. Одной из ключевых проблем в этой связи является крайне высокая доля (около 70 % для мира в целом) твердых коммунальных отходов, отправляемых для захоронения на полигоны или вовсе вывозимых на стихийные свалки. Разрастающиеся с каждым годом размеры отчуждаемых под эти цели территорий и усиливающаяся вследствие несовершенства технологий захоронения нагрузка на окружающую среду оказывают значительное негативное воз-

[1] World Bank. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. URL: https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317 (дата обращения 14.05.2020).

действие на экосистему, в том числе на общественное здоровье и качество жизни населения.

Россия характеризуется еще более тревожной ситуацией в этой сфере. Так, согласно статистике Росстата, в Российской Федерации в 2017 г. 89 % от 57,1 млн тонн образованных в данном году ТКО было отправлено для захоронения на полигонах [1].

Серьезность указанных проблем понимается как на мировом уровне, так и на уровне отдельных стран. Так, согласно докладу Организации объединенных наций «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года» от 25 сентября 2015 г., в котором определены 17 глобальных целей устойчивого развития человечества, в качестве одной из них обозначается «чистая вода и санитария, устойчивые города и населенные пункты, ответственные потребление и производство, сохранение экосистем».

В России основными документами, регулирующими сферу обращения с ТКО, являются Федеральный закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» и утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 января 2018 г. № 84-р «Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года». В данных документах в качестве ключевых направлений развития сферы обращения с отходами указываются комплексная переработка материально-сырьевых ресурсов в целях уменьшения количества отходов, предотвращение образования отходов, формирование и перспективное развитие новой отрасли промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов и др. Однако Российская Федерация во многом находится в самом начале своего пути к достижению отмеченных выше целей устойчивого развития, и, к сожалению, пока нельзя говорить об ее заметном продвижении в развитии сферы обращения с отходами.

На сегодняшний день одной из основных причин недостаточного развития сферы обращения с ТКО в России видится не отвечающая современным требованиям форма ее организации. Для выхода на качественно новый уровень данная сфера должна обеспечивать как экономическую, так и экологическую эффективность своего функционирования. Под экономической эффективностью нами понимается получение большей выгоды для всех субъектов от применения альтернативных, по сравнению с традиционным для России захоронением на полигонах, способов обращения с ТКО, прежде всего их переработки во вторичное сырье и энергию. Под экологической эффективностью понимается постоянное снижение негативного воздействия образующихся и накопленных ТКО на окружающую среду, которое может выражаться, в том числе, в снижении доли отходов, отправляемых для захоронения на полигоны. Принятие решений по модернизации данной сферы, таким образом, должно основываться на комплексной оценке возникающих в связи с этим эффектов и их воздействия как на всю экономическую систему, так и на окружающую среду и качество жизни населения. В этой связи возникает потребность в разработке соответствующих подходов к получению указанных оценок, что предполагает развитие аппарата математического моделирования сферы обращения с ТКО.

Существующие подходы к моделированию сферы обращения с ТКО можно разделить на три основные группы: агентские модели, модели общего равновесия и межотраслевые модели. Краткая характеристика основных рассмотренных подходов с учетом факторов экономической и экологической эффективности приведена в таблице.

Использование агентских моделей для описания сферы обращения с ТКО достаточно обширно представлено в современной литературе. В самом общем виде подобные модели представляют собой набор агентов, каждый из которых, взаимодействуя с другими участниками, максимизирует собственную выгоду, которая может выражаться в виде получаемой от потребления товаров и услуг полезности, прибыли от их производства и других величин. Наиболее типичным для этого класса моделей является следующий набор агентов:

- источники образования ТКО, а именно домашние хозяйства и фирмы;
- транспортные предприятия, осуществляющие перемещение отходов на разных этапах обращения с ними;
- сортировочные центры, в которых происходит разделение ТКО на отдельные фракции или группы фракций;
- перерабатывающие предприятия, осуществляющие обращение с отходами в различных формах (переработка, сжигание, компостирование, захоронение на полигонах и т. д.).

Часть рассмотренных агентских моделей в принципе не учитывают фактор воздействия сферы обращения с ТКО на окружающую среду. Так, к примеру, Т. В. Великанова [2], П. Коушик и др. [3], М. А. Ширази и др. [4] предлагают модели линейного программирования, в которых единственным критерием оптимизации является минимизация совокупных расходов системы. Такой подход представляется недостаточно полным, так как учет только экономической составляющей эффективности может приводить к тривиальному решению в виде захоронения всего объема ТКО на полигонах, что является неприемлемым с позиций минимизации нагрузки на окружающую среду региона. Этим же недостатком обладает и подход, предложенный Я. Соукопова и И. Калина [5], основанный на концепции чистого приведенного дохода (NPV) для оценки стоимости обращения с отходами разными способами, такими как переработка, сжигание, захоронение на полигонах и др. В случае если захоронение на полигонах оказывается наименее затратным из видов обращения, модель предполагает, что будет выбран именно этот способ. Не учитывает фактор влияния на окружающую среду и модель, предложенная Й. Ли и др., использующая теорию нечетких множеств для отражения неопределенности при минимизации расходов всей системы [6].

Примером агентской модели, учитывающей при оптимизации оба обозначенных выше фактора, является подход, предложенный М. Раббани и др. [7]. Однако данная модель служит только для выбора оптимальных мест размещения объектов, занимающихся обращением с ТКО. В модели две минимизируемые целевые функции: совокупные расходы транспортной системы и совокупное ее влияние на окружающую среду. Последняя учитывает два аспекта: объем автомобильных выбросов в атмосферу при транспортировке ТКО и объем выбросов,

Некоторые подходы к моделированию сферы обращения с ТКО
Some approaches to modeling the sphere of MSW management

Модель	Учет эффективности	
	экономической	экологической
Агентские модели		
Модель размещения объектов обращения с отходами в регионе (Т. В. Великанова)	Минимизация совокупных расходов системы	Отсутствует
Комплексная модель оптимизации для интегрированной системы управления твердыми отходами (П. Коушик и др.)	Минимизация совокупных расходов системы	Отсутствует
Модель сферы обращения с ТКО Тегерана (М. А. Ширази и др.)	Минимизация совокупных расходов системы	Отсутствует
Математическая модель экономики обращения с городскими отходами Чехии (Я. Соукопова и И. Калина)	Оценка стоимости обращения с отходами через NPV и выбор наименее затратного способа	Отсутствует
Математическая модель для определения оптимальной политики управления отходами в условиях неопределенности (Й. Ли и др.)	Минимизация совокупных расходов системы в условиях неопределенности	Отсутствует
Математическая модель для проектирования системы твердых бытовых отходов с учетом экологических проблем (М. Раббани и др.)	Минимизация совокупных расходов системы транспортирования ТКО	Совокупное влияние на окружающее среду, измеренное выбросами в атмосферу
Модель рынка утилизации твердых бытовых отходов города-курорта (А. Копырин)	Отсутствует	Отсутствует

Окончание таблицы

Модель	Учет эффективности	
	экономической	экологической
Модели общего равновесия		
Мягко связанная модель управления отходами с CGE-моделью Швеции (Д. Остблом и др.)	Минимизация совокупных расходов системы	Отсутствует
Вычислимая модель общего равновесия Китая с блоком обращения с ТКО (Дж. Ли и др.)	Минимизация совокупных расходов системы	Отсутствует
Прикладная модель общего равновесия (Х. Бартелингс и др.)	Прогнозирование различных сценариев в отношении итоговой структуры обращения с отходами	Равновесие на рынках Прибыльность или убыточность фирм по обращению с ТКО не рассматривается
Модель общего экономического равновесия с анализом материальной переработки (Й. Мийата и др.)	Минимизация совокупных расходов системы	Отсутствует
Модель общего равновесия Японии (С. Окушима и др.)	Фирмы в сфере обращения с ТКО максимизируют прибыль и конкурируют с поставщиками ресурсов из первичного сектора	Отсутствует
Межотраслевые модели		
Балансовая модель Леонтьева – Форда, учитывающая утилизацию вредных отходов (Ф. Х. Асхакова)	Максимизация выпуска экономики	Минимизации общего объема экологически вредных отходов производства
Динамическая модель межотраслевого баланса, учитывающая выделение вредных отходов (Т. А. Костенко, Е. М. Петлина)	Производство минимально необходимого количества полезного продукта в экономике	Вектор вредных отходов не должен превышать заданную величину

Источник: составлено авторами.

которых удалось избежать из-за введения в эксплуатацию сортировочных и перерабатывающих объектов. Важно отметить, что практическое применение подобного подхода сильно ограничено из-за отсутствия достоверных данных. Сами авторы подчеркивают этот факт, используя для демонстрации функционирования модели условный численный пример.

Исследователями сферы обращения с ТКО предлагаются также агентские модели, в которых оптимизация отсутствует. Например, модель А. Копырина представляет собой систему дифференциальных уравнений, оцениваемых на реальных данных для целей прогнозирования таких показателей, как объем образующихся ТКО, уровень выбросов, численность населения города, показатели рождаемости, смертности, а также некоторых других [8]. Однако отсутствие какой-либо оптимизационной составляющей, которая бы позволяла определять направление развития региональной сферы обращения с ТКО в сторону повышения экологической и / или экономической эффективности, делает этот подход слабо применимым для практических целей.

В качестве еще одного недостатка рассмотренных выше моделей можно назвать используемое в них понимание экономической эффективности сферы обращения с ТКО как минимизации совокупных издержек системы. Такое видение не в полной мере соответствует современному пониманию сферы обращения с отходами как неотъемлемой части цикличной экономики (circular economy). В рамках данной концепции отходы рассматриваются как ценный ресурс, который с позиций экономической эффективности должен быть возвращен для использования в экономику, а не выведен из нее. В современной литературе все чаще поднимается вопрос о месте ТКО в цикличной экономике [9; 10]. В этой связи важно взглянуть на экономическую эффективность не как на минимизацию издержек, а как на максимизацию прибыли каждого из участников системы отдельно.

Расширение моделей общего равновесия на основе описания сферы обращения с ТКО может осуществляться разными способами. К примеру, Д. Остблом и др. описывают вычислимую модель общего равновесия (CGE), разработанную для шведской экономики, и отдельную модель для сферы обращения с ТКО (NatWaste) [11]. Результаты одной модели являются входными данными для второй и наоборот. Так, например, из NatWaste в CGE модель передается стоимость различных способов обращения с отходами. В свою очередь, Дж. Ли и др. рассматривают систему обращения с ТКО как отдельную отрасль, встроенную в общую CGE модель [12]. Некоторые авторы предлагают разбить данную отрасль на несколько и рассматривать их как отдельные сектора экономики. Сектора могут отличаться как способами обращения с отходами [13], так и типом перерабатываемых отходов [14; 15].

Учет экономической и экологической эффективности сферы обращения с ТКО в рамках моделей общего равновесия также осуществляется разными авторами по-разному. Так, в [11; 12; 14] минимизируются совокупные издержки обращения с ТКО, при этом какая-либо оптимизация в отношении влияния системы на окружающую среду в данных моделях отсутствует. Х. Бартелингс и др., напротив, для учета достижения целей по снижению негативного воздействия ТКО на экосистему предлагает использовать инструментарий сценарного прогнозирования [13]. Так, например, один из сценариев может предполагать уве-

личение доли перерабатываемых ТКО благодаря развитию и внедрению новых технологий в этой сфере. Однако в указанном подходе аспект повышения экономической эффективности не исследуется должным образом. Вместо этого, например, может приниматься предположение, что объем переработки ТКО в оптимальной точке будет равен спросу домашних хозяйств. При этом прибыльность или убыточность предприятий, занимающихся переработкой, остается за рамками анализа. Модель, в которой предприятия, занимающиеся обращением с ТКО, максимизируют собственную прибыль, предложили С. Окушима и др. [15]. В ней данные предприятия являются конкурентами фирм, производящих аналогичную продукцию, но из первичного сырья. Однако в данной модели не учтено негативное воздействие ТКО на окружающую среду и не обозначены какие-либо цели по его снижению.

Подходы, основанные на построении межотраслевых моделей, в основном акцентируют свое внимание на отходах производства, их переработке и возникающих в результате этого межотраслевых взаимосвязей. Включению в общую схему межотраслевого моделирования сферы обращения с ТКО уделяется недостаточно внимания. Анализ основных межотраслевых подходов к моделированию сферы обращения с отходами позволяет также указать и на недостаточный учет аспектов экономической эффективности. Так, Ф. Х. Асхакова предлагает использовать векторную оптимизацию в балансовой модели Леонтьева – Форда, учитывающей утилизацию вредных отходов [16]. Одновременно решается задача максимизации общего выпуска и минимизации общего объема вредных отходов производства, через которую в модель и заложена экологическая эффективность системы. Однако вопрос экономической привлекательности различных способов обращения с отходами остается за рамками проводимого на этой основе анализа. Таким же недостатком обладает и предложенная Т. А. Костенко и Е. М. Петлиной динамическая модель межотраслевого баланса, учитывающая выделение вредных отходов, а также двойственная к ней [17]. Влияние на окружающую среду в указанном подходе измеряется вектором вредных отходов, значение которого не должно превышать заданную величину при условии производства минимально необходимого объема полезного продукта.

По результатам рассмотрения различных подходов к моделированию сферы обращения с ТКО можно сделать вывод о перспективности построения региональной (как и впоследствии межрегиональной) модели межотраслевого баланса, дополненной блоком, описывающим функционирование данной сферы. Такая модельная конструкция позволит описать взаимосвязи между выпуском сферы обращения с ТКО (объем производства вторичного сырья, энергии, компоста и др.) и промежуточными затратами других отраслей. Это также должно способствовать более полному учету как экономической, так и экологической эффективности сферы обращения с ТКО.

С учетом сказанного можно предложить следующую концепцию моделирования сферы обращения с ТКО регионов России. Предлагаемый подход основывается на построении агентской модели, которая затем может быть интегрирована в качестве детализированного блока в региональную межотраслевую модель. Основные субъекты региональной сферы обращения с ТКО и взаимосвязи между ними, учитываемые в рамках предлагаемой концепции, представлены на рисунке.

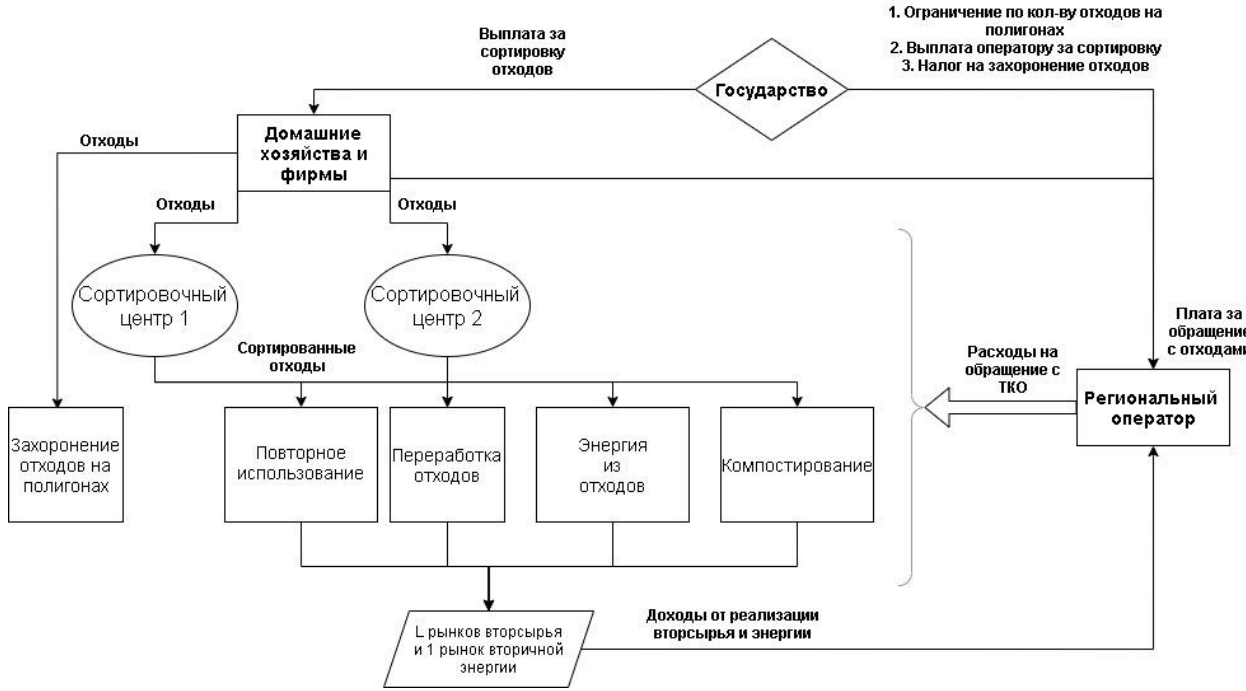

Схема моделирования региональной сферы обращения с ТКО с учетом мер региональной экологической политики
Scheme for modeling the regional sphere of MSW management, taking into account the measures of regional environmental policy

Первым типом агентов в рамках данной концепции являются домашние хозяйства и фирмы, в результате деятельности которых, с одной стороны, образуются ТКО, а с другой – производится их первичная сортировка (разделение). В самом простом виде данные агенты не имеют собственных целевых функций, а возможность выбора для них заключается в том, сортировать или нет образующиеся отходы. На этот выбор влияет размер скидки от государства на тариф за обращение с ТКО. Чем выше размер данной скидки, тем большая доля домашних хозяйств и фирм принимает решение о сортировке отходов.

Второй агент – это региональный оператор, отвечающий за обращение с ТКО в регионе. В его функции входит обеспечение транспортировки ТКО, их сортировки, а также обработки различными способами, такими как переработка, компостирование, повторное использование, выработка энергии и захоронение на полигоне. Для каждого региона строится транспортная матрица, определяющая стоимости доставки отходов от домашних хозяйств и фирм на места их сортировки и обработки. Региональный оператор стремится максимизировать собственную прибыль при имеющихся ресурсах в виде собранных тарифов от домашних хозяйств и фирм и ограничениях в сфере обращения с ТКО, устанавливаемых государством. Помимо тарифов, доходы регионального оператора образуются за счет реализации вторсырья и энергии, полученных в результате обработки отходов. Каждый вид обработки отходов характеризуется показателями затрат и ограничением сверху на объем перерабатываемых отходов.

Наконец, третий агент, представляющий собой государство, минимизирует негативное влияние всей сферы обращения с отходами на окружающую среду, которое измеряется в количестве отходов, отправленном на полигоны для захоронения. У государства есть ряд инструментов для достижения данной цели:

- выплаты (или установление льготных тарифов) домашним хозяйствам и фирмам за объем отсортированных ими отходов;
- установление ограничения на максимальное количество отходов, которое региональный оператор может отправить на полигоны с учетом производственных ограничений альтернативных способов обращения с отходами;
- налог на захоронение отходов на полигонах;
- выплата региональному оператору за объем отсортированных им отходов;
- закупка у регионального оператора вторсырья и энергии, полученной из отходов; и др.

При этом у государства есть финансовое ограничение в виде объема бюджетных средств, выделяемых на регулирование сферы обращения с ТКО.

Предполагается, что в результате переработки ТКО оператор производит реализуемые на отдельных рынках виды вторсырья, а также электрическую энергию. Без потери общности при соответствующих модификациях можно также учесть образование и реализацию на рынке тепловой энергии.

Предлагаемый подход позволяет, таким образом, учитывать как экологическую (через минимизацию государством количества ТКО, направляемых на захоронение), так и экономическую эффективность (через максимизацию прибыли региональным оператором) сферы обращения с отходами.

Список литературы

1. Охрана окружающей среды в России. 2018: Стат. сб. М.: Росстат, 2018. 125 с.
2. **Великанова Т. В.** Методы и модели размещения объектов обращения с отходами в регионе // Фундаментальные исследования. 2013. № 11. С. 1289–1293.
3. **Koushik P., Subhasish C., Amit D., Akhouri P. K., Subhabrata R.** A comprehensive optimization model for integrated solid waste management system: A case study. *Environmental Engineering Research*, 2019, vol. 24 (2), p. 220–237.
4. **Shirazi M. A., Samieifard R., Abduli M. A., Omidvar B.** Mathematical modeling in municipal solid waste management: case study of Tehran. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2016, vol. 14, article № 8.
5. **Soukopová J., Kalina J.** Mathematical model of economics of municipal waste management. In: Proceedings of 30th International Conference Mathematical Methods in Economics, 2012, vol. 30, p. 823–829.
6. **Li Y. P., Huang G. H., Nie S. L.** A mathematical model for identifying an optimal waste management policy under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 2012,vol. 36, p. 2658–2673.
7. **Rabbani M., Mokhtarzadeh M., Farrokhi-Asl H.** A New Mathematical Model for Designing a Municipal Solid Waste System Considering Environmentally Issues. *International Journal of Supply and Operations Management*, 2018, vol. 5, p. 234–255.
8. **Kopyrin A.** Modelling of municipal solid waste utilisation market of a resort city. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 91, article № 04004.
9. **Malinauskaite J., Jouhara H., Spencer N.** Waste Prevention and Technologies in the Context of the EU Waste Framework Directive: Lost in Translation? *European Energy and Environmental Law Review*, 2017, vol. 26 (3), p. 66–80.
10. **Plastinina I., Teslyuk L., Dukmasova N., Pikalova E.** Implementation of Circular Economy Principles in Regional Solid Municipal Waste Management: The Case of Sverdlovskaya Oblast (Russian Federation). *Resources*, 2019, vol. 8, iss. 2, p. 90.
11. **Östblom G., Söderman M. L., Sjöström M.** Analysing future solid waste generation – Soft linking a model of waste management with a CGE-model for Sweden. *The National Institute of Economic Research Working Paper*, 2010, no. 118.
12. **Li G., Masui T.** Assessing China's Waste Management Activities Using a Computable General Equilibrium Model. *Chemical Engineering Transactions*, 2018, vol. 63, p. 67–72.
13. **Bartelings H., Dellink R., Ierland E. C. van.** Modeling Market Distortions in an Applied General Equilibrium Framework: The Case of Flat-Fee Pricing in the Waste Market. *Economics of Industrial Ecology. Materials, Structural Change, and Spatial Scales*, 2004, p. 255–286.
14. **Miyata Y., Pang X.** A General Equilibrium Analysis of the Economic waste System with Material Recycling – A CGE modelling Approach. In: 39th Congress

of the European Regional Science Association: “Regional Cohesion and Competitiveness in 21st Century Europe”, 1999.

15. **Okushima S., Yamashita H.** A General Equilibrium Analysis of Waste Management Policy in Japan. *Hitotsubashi Journal of Economics*, 2005, vol. 46 (1), p. 111–134.
16. **Асхакова Ф. Х.** Векторная оптимизация в балансовой модели Леонтьева – Форда, учитывающей утилизацию вредных отходов // Изв. Рос. гос. пед. ун-та им. А. И. Герцена. 2007. № 45. С. 30–33.
17. **Костенко Т. А., Петлина Е. М.** Динамическая модель межотраслевого баланса, учитывающая выделение вредных отходов, и двойственная к ней модель // Изв. высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2008. № 2. С. 11–16.

References

1. Environmental protection in Russia. 2018. Moscow, Rosstat Publ., 2018, 125 p. (in Russ.)
2. **Velikanova T. V.** Methods and models for the placement of waste management facilities in the region. *Fundamental Researches*, 2013, no. 11, p. 1289–1293. (in Russ.)
3. **Koushik P., Subhasish C., Amit D., Akhouri P. K., Subhabrata R.** A comprehensive optimization model for integrated solid waste management system: A case study. *Environmental Engineering Research*, 2019, vol. 24 (2), p. 220–237.
4. **Shirazi M. A., Samieifard R., Abduli M. A., Omidvar B.** Mathematical modeling in municipal solid waste management: case study of Tehran. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2016, vol. 14, article № 8.
5. **Soukopová J., Kalina J.** Mathematical model of economics of municipal waste management. In: Proceedings of 30th International Conference Mathematical Methods in Economics, 2012, vol. 30, p. 823–829.
6. **Li Y. P., Huang G. H., Nie S. L.** A mathematical model for identifying an optimal waste management policy under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 2012,vol. 36, p. 2658–2673.
7. **Rabbani M., Mokhtarzadeh M., Farrokhi-Asl H.** A New Mathematical Model for Designing a Municipal Solid Waste System Considering Environmentally Issues. *International Journal of Supply and Operations Management*, 2018, vol. 5, p. 234–255.
8. **Kopyrin A.** Modelling of municipal solid waste utilisation market of a resort city. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 91, article № 04004.
9. **Malinauskaite J., Jouhara H., Spencer N.** Waste Prevention and Technologies in the Context of the EU Waste Framework Directive: Lost in Translation? *European Energy and Environmental Law Review*, 2017, vol. 26 (3), p. 66–80.
10. **Plastinina I., Teslyuk L., Dukmasova N., Pikalova E.** Implementation of Circular Economy Principles in Regional Solid Municipal Waste Management: The Case of Sverdlovskaya Oblast (Russian Federation). *Resources*, 2019, vol. 8, iss. 2, p. 90.

11. **Östblom G., Söderman M. L., Sjöström M.** Analysing future solid waste generation – Soft linking a model of waste management with a CGE-model for Sweden. *The National Institute of Economic Research Working Paper*, 2010, no. 118.
12. **Li G., Masui T.** Assessing China's Waste Management Activities Using a Computable General Equilibrium Model. *Chemical Engineering Transactions*, 2018, vol. 63, p. 67–72.
13. **Bartelings H., Dellink R., Ierland E. C. van.** Modeling Market Distortions in an Applied General Equilibrium Framework: The Case of Flat-Fee Pricing in the Waste Market. *Economics of Industrial Ecology. Materials, Structural Change, and Spatial Scales*, 2004, p. 255–286.
14. **Miyata Y., Pang X.** A General Equilibrium Analysis of the Economic waste System with Material Recycling – A CGE modelling Approach. In: 39th Congress of the European Regional Science Association: "Regional Cohesion and Competitiveness in 21st Century Europe", 1999.
15. **Okushima S., Yamashita H.** A General Equilibrium Analysis of Waste Management Policy in Japan. *Hitotsubashi Journal of Economics*, 2005, vol. 46 (1), p. 111–134.
16. **Ashakova F. H.** Vector optimization in the Leontiev – Ford balance model that takes into account the disposal of hazardous waste. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*, 2007, no. 45, p. 30–33. (in Russ.)
17. **Kostenko T. A., Petlina E. M.** A dynamic model of input-output balance, taking into account the emission of hazardous waste, and a dual model. *Bulletin of Higher Education Institutes North Caucasus Region. Natural Sciences*, 2008, no. 2, p. 11–16. (in Russ.)

Материал поступил в редколлегию 22.12.2020
Принят к печати 21.01.2020
The article was submitted 22.12.2020
Accepted for publication 21.01.2020

Сведения об авторах

Гильмундинов Вадим Манавирович, доктор экономических наук, зам. директора по научной работе, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН (Новосибирск, Россия), доцент Новосибирского государственного университета (Новосибирск, Россия)

gilmundinov@mail.ru
SPIN-code 6637-3274
ORCID 0000-0002-1991-0114
Scopus Author ID 56500677800
WoS Researcher ID N-2384-2013

Рогачев Никита Сергеевич, аспирант, инженер, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН (Новосибирск, Россия)

rogachev95@mail.ru

Information about the Authors

Vadim M. Gilmundinov, Doctor of Sciences (Economics), Deputy Director for Sciences, Institute of Economics and Industrial Engineering of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation); Associate Professor, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)

gilmundinov@mail.ru
SPIN-code 6637-3274
ORCID 0000-0002-1991-0114
Scopus Author ID 56500677800
WoS Researcher ID N-2384-2013

Nikita S. Rogachev, Postgraduet Student, Engineer, Institute of Economics and Industrial Engineering of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation)

rogachev95@mail.ru