

EDN: NHMCSS
УДК 504.03

Modeling of the Regional System of Municipal Solid Waste Management, Taking into Account Environmental and Economic Efficiency Factors

Vadim M. Gilmindinov^{a, b} and Nikita S. Rogachev^{*a}

^a*Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS*

^b*Novosibirsk State University*

Novosibirsk, Russian Federation

Received 20.04.2023, received in revised form 25.12.2023, accepted 18.01.2024

Abstract. The article raises the problems existing in the regions of Russia related to the management of municipal solid waste (MSW). The study noted that despite the ongoing changes, the situation in many regions of the country remains difficult and close to critical. Separately, the research highlighted need for high-quality tools, which allows modeling the impact of various changes in the operation of regional MSW management systems on the way to achieving environmental and economic efficiency. Authors provided a review of the approaches to the creation of such tools existing in the modern literature as well as the strengths and weaknesses of the presented models. The article contains a detailed description of the model of the regional MSW management system developed by the authors. The study confirmed the consistency of the approach by calculations on the example of the Novosibirsk region. Authors carried out modeling within the framework of various potential scenarios for the development of the MSW management system in the region with conclusions and recommendations made regarding the development vectors of the Novosibirsk Region in MSW management.

Keywords: municipal solid waste, waste management, processing, recycling, landfilling, mathematical programming, scenario forecasting, Novosibirsk region, separate waste collection, environmental and economic efficiency.

Research area: social structure, social institutions and processes (socio-logical sciences); regional and sectoral economy.

This study was funded by the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of Russia in the framework of a large-scale research 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 (grant № 13.1902.21.0016).

Citation: Gilmindinov V.M., Rogachev N.S. Modeling of the regional system of municipal solid waste management, taking into account environmental and economic efficiency factors. In: *J. Sib. Fed. Univ. Humanit. soc. sci.*, 2024, 17(3), 506–517. EDN: NHMCSS



Моделирование региональной системы обращения с твердыми коммунальными отходами с учетом факторов экологической и экономической эффективности

В.М. Гильмундинов^{а,б}, Н.С. Рогачев^а

^а*Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН*

^б*Новосибирский государственный университет
Российская Федерация, Новосибирск*

Аннотация. В статье поднимаются существующие в регионах России проблемы, связанные с обращением с твердыми коммунальными отходами (ТКО). Отмечается, что, несмотря на проводимые изменения, ситуация во многих регионах страны остается сложной и близкой к критической. Отдельно выделяется необходимость качественного инструментария, позволяющего моделировать влияние различных изменений в работе региональных систем обращения с ТКО на пути к достижению экологической и экономической эффективности. Приводится обзор существующих в современной литературе подходов к созданию подобного инструментария, выделяются сильные и слабые стороны представленных моделей. Изложено подробное описание модели региональной системы обращения с ТКО, разработанной авторами. Состоятельность подхода подтверждена расчетами на примере Новосибирской области. Проведено моделирование в рамках различных потенциальных сценариев развития системы обращения с ТКО региона, изложены выводы и рекомендации относительно векторов развития Новосибирской области относительно обращения с ТКО.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, обращение с отходами, переработка, захоронение, полигон, математическое программирование, сценарное прогнозирование, Новосибирская область, раздельный сбор отходов, экологическая и экономическая эффективность.

Научная специальность: 5.4.4. Социальная структура, социальные институты и процессы (социологические науки); 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика.

Статья подготовлена по результатам исследования, проводимого при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования России в рамках крупного научного 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 г. (грант № 13.1902.21.0016).

Цитирование: Гильмундинов В. М., Рогачев Н. С. Моделирование региональной системы обращения с твердыми коммунальными отходами с учетом факторов экологической и экономической эффективности. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Гуманитарные науки*, 2024, 17(3), 506–517. EDN: NHMCSS

Введение

Рост численности населения, усиливающаяся урбанизация, расширение логистических цепочек вследствие цифровизации и пандемии делают вопросы совершенствования сферы обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) все более острыми и актуальными для регионов России. Во многих из них, несмотря на проведенную «мусорную» реформу и интеграцию региональных операторов в сферу обращения с отходами, сложилась критическая ситуация, требующая оперативных и скоординированных действий властей со всеми участниками процесса. Сложившаяся в регионах России система обращения с ТКО устарела и требует существенного реформирования в направлении современных принципов защиты окружающей среды и ресурсной эффективности. Ключевыми проблемами выступают чрезмерно высокая доля захоронения ТКО на полигонах при близкой к критической степени их заполненности, отсутствие современной инфраструктуры сбора, сортировки и переработки отходов, слабо развитая система раздельного сбора. В результате данная сфера оказывает возрастающее негативное воздействие на окружающую среду, сопровождающееся ростом социальной напряженности.

Цели государственной политики в сфере обращения с отходами, определенные в Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года (Об утверждении..., 2018), предполагают развитие переработки сырья для снижения образования отходов, создание новой отрасли промышленности по обращению с отходами и другие меры, соответствующие целям устойчивого развития ООН.

Для научного обоснования подобных структурных изменений необходим инструментарий моделирования различных сценариев развития региональных систем

обращения с ТКО, позволяющий получать количественные оценки в рамках экологического и экономического аспекта, а также определять результативность реализации регулирующих мер в соответствии с государственными целями и задачами. Разработке подобного инструментария и его апробации на примере Новосибирской области посвящено настоящее исследование.

Подходы к построению моделей системы обращения с ТКО

Современные подходы в данной области можно разделить на три группы: агентские модели, межотраслевые и общеравновесные модели. Подробный критический обзор существующих подходов к такому моделированию опубликован нами в работе (Gilmundinov, Rogachev, 2021).

В большинстве агентских моделей (см., например: (Velikanova, 2013), (Koushik et al., 2019), (Li et al., 2012), (Shitazi et al., 2016), (Soukopová et al., 2012)) не учитывается фактор влияния образующихся отходов на окружающую среду. Пример агентского подхода, учитывающего «зеленый» и экономические факторы, приведен в (Rabbani et al., 2018). При этом эта модель позволяет лишь выбирать наилучшие места размещения объектов инфраструктуры по обращению с ТКО. Сильно ограниченным видится понимание в данных подходах экономического критерия эффективности как минимизации совокупных издержек. В современной парадигме отходы понимаются как ценный ресурс, большая часть которого может быть возвращена в экономический цикл для извлечения выгоды. Поэтому представляется более целесообразным говорить об экономической эффективности системы обращения с ТКО как о максимизации прибыли ее отдельных участников. Существуют также агентские модели без оптимизации в явном виде. Например, в (Korygin, 2019) описана

модель в виде системы дифференциальных уравнений, позволяющая прогнозировать значения различных показателей системы обращения с ТКО.

Схожие недостатки присущи моделям общего равновесия (general equilibrium models), в которые различными способами интегрируется блок обращения с ТКО. Так, в (Li et al., 2018), (Miyata, 1995), (Östblom et al., 2010) осуществляется минимизация издержек обращения с отходами без оптимизации в отношении воздействия отходов на окружающую среду. В работе же (Bartelings et al., 2004), напротив, достижение целей по снижению воздействия на экосистему учтено и реализовано через сценарное прогнозирование. Однако при этом финансовый результат деятельности участников системы не рассматривается. Модель с максимизацией прибыли представлена авторами в (Okushima et al., 2005). В ней описываются механизмы конкуренции между предприятиями-переработчиками отходов и производителями продукции из первич-

ного сырья. При этом фактор влияния ТКО на окружающую среду не исследуется.

Межотраслевые модели в своем большинстве рассматривают отходы производства, при этом сфера обращения с ТКО не детализируется достаточным образом. Также остается проблема ограниченного учета экономической эффективности данной сферы. Так, в работе (Askhakova, 2007) минимизируется количество отходов производства и максимизируется общий выпуск. При этом экономические показатели обращения с ТКО в контексте данной модели не изучаются. Динамическая модель межотраслевого баланса, учитывающая выделение вредных отходов (Kostenko et al., 2008), имеет схожий недостаток. В ней авторы изучают влияние ТКО на окружающую среду посредством введения вектора вредных отходов, который не должен иметь значение выше заданной величины при условии производства минимально необходимого объема продукта в экономике.

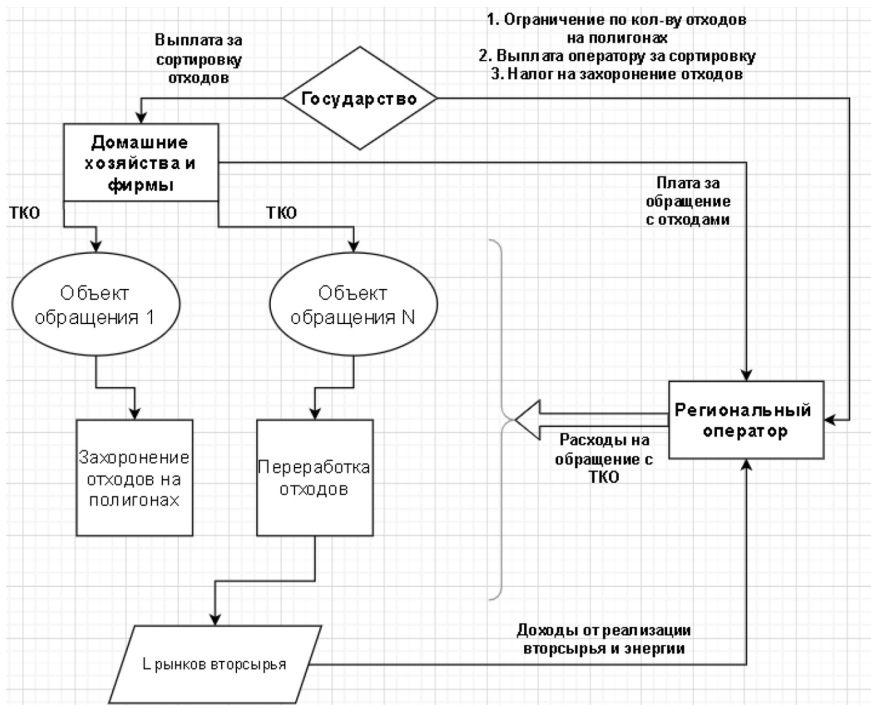


Рис. 1. Схема предлагаемого подхода
 Fig. 1. The scheme of the proposed approach

Таким образом, существующие подходы не позволяют в полной мере решать обозначенные выше задачи и нуждаются в дальнейшем развитии.

Предлагаемый подход

Разработанный нами подход относится к классу агентских и предполагает независимое принятие решения субъектами системы с формированием в результате общего равновесия в сфере обращения с ТКО региона. Концептуально подход представлен на рис. 1.

Первая группа агентов включает в себя домашние хозяйства (ДХ), которые производят ТКО, а также принимают решение об их раздельном накоплении исходя из склонности к раздельному сбору и доступности инфраструктуры для его осуществления.

Вторая группа агентов представлена региональным оператором, который полностью осуществляет обращение с ТКО в регионе, а именно сбор, транспортировку, утилизацию отходов и реализацию вторичного сырья. Региональный оператор максимизирует прибыль от своей деятельности, выбирая транспортные маршруты перемещения отходов между объектами сферы обращения с ТКО, а также способы обращения с отходами.

Также оператор получает доход в виде уплачиваемого домашними хозяйствами тарифа на обращение с ТКО, который является единым для всего региона. При этом оператор своими действиями напрямую не может влиять на размер этого дохода, поэтому он не входит в оптимизационную часть модели. На доход оператора от тарифных платежей влияет непосредственно значение самого тарифа, а также предоставляемая государством скидка за осуществление раздельного сбора отходов (РСО).

Третий участник системы – государство, которое с целью минимизации негативного воздействия образующихся в регионе отходов на окружающую среду может использовать набор ограничительных и поощрительных мер в отношении других участников системы.

Таким образом, модель представляет собой математическую задачу, в которой региональный оператор, максимизируя прибыль, принимает решение о том, на каких объектах и каким образом осуществлять утилизацию ТКО, оптимизируя при этом также и маршруты транспортировки отходов. Доходы оператора складываются из реализации вторсырья, полученного в результате переработки ТКО. Расходная часть состоит из затрат на транспортировку отходов и их утилизацию с помощью различных способов (технологий). При этом упомянутые выше факторы экологической и экономической эффективности учитываются в модели через показатели объемов захоронения ТКО на полигонах и финансового результата деятельности оператора соответственно. Математическое описание модели не приводится в силу его большого объема. Код для осуществления расчетов по модели в среде программирования R представлен в Приложении к данной статье.

Информационная база для расчетов по Новосибирской области

Информационная база исследования определялась исходя из пространства переменных, параметров и ограничений разработанной модели. Новосибирская область (НСО) была разделена на 44 района образования ТКО, в которые вошли 10 районов г. Новосибирска, 30 районов Новосибирской области, а также города Бердск, Искитим, Обь и рабочий поселок Кольцово. На основании данных о численности населения и установленного в территориальной схеме норматива накопления отходов в размере 392,95 кг на душу населения была рассчитана масса ежегодного образования ТКО в каждом из 44 районов. Далее был сформирован перечень из 28 объектов обращения с ТКО региона, куда вошли 21 полигон захоронения отходов и 7 объектов их переработки с возможностью извлечения полезных фракций и реализации вторсырья для получения дохода. Также с помощью данных из территориальной схемы для каждого из объектов была определена максимально возможная годовая мощность об-

ращения с отходами. Удельные транспортные расходы были определены с помощью данных от ООО «Айсберг» – компании, осуществляющей транспортировку и обращение с отходами на территории НСО.

Также в информационную базу для расчетов по модели вошли:

- Матрица расстояний между районами образования отходов и объектами обращения, состоящая из 1232 элементов;
- Морфологическая структура ТКО и РСО: стекло, ПЭТ, макулатура и остальные отходы;
- Функции удельных расходов на переработку и захоронение отходов;
- Цены на каждый из трех видов вторичного сырья;
- Количество раздельно собираемых ТКО в каждом из 44 выделенных районов.

Таким образом, модель представляет собой задачу квадратичного программирования, в которой осуществляется оптимизация по 1260 переменным: 28 переменным обращения с отходами и 1232 транспортным переменным. Задача была решена в среде программирования R с помощью пакета «ROI.plugin.qpoases».

Результаты расчетов по Новосибирской области

Для проведения расчетов были заложены несколько базовых сценариев развития системы обращения с ТКО НСО, а также метрики, позволяющие сравнивать результаты разных сценариев между собой. Среди них: доля отходов, отправляемых на захо-

ронение на полигонах, доля перерабатываемых отходов от их общего числа и годовая прибыль/убыток регионального оператора. Первые два показателя характеризуют экологическую эффективность системы, последний – экономическую. Итоговые результаты расчетов по заложенным сценариям представлены в табл. 1.

Сценарий 1. Текущее состояние системы обращения с ТКО НСО

Первым сценарием для расчетов стало моделирование текущей ситуации в сфере обращения с ТКО НСО. В первую очередь этот этап необходим для оценки качества результатов расчетов по модели относительно степени их соответствия действительности. Согласно расчетам результатом работы оператора стал убыток (без учета доходов от тарифа) в размере 2,93 млрд руб. в год. Доход от тарифа без РСО и при отсутствии его государственного стимулирования составил 2,9 млрд руб. в год, в результате чего итоговым финансовым результатом оператора стал годовой убыток в размере 26,3 млн руб. Полученные значения в целом соответствуют реалиям, в которых региональный оператор накопил достаточно существенный объем задолженности перед перевозчиками и компаниями, осуществляющими размещение ТКО на полигонах. Такой результат может говорить как о возможном заниженном значении тарифа на услуги оператора, который не покрывает расходы на обращение с ТКО в регионе, так и о недостаточном исполь-

Таблица 1. Эффективность различных сценариев развития системы обращения с ТКО НСО
Table 1. Effectiveness of various scenarios for the development of the MSW management system

Сценарий/показатель	Доля отходов, отправляемых на полигоны, %	Доля перерабатываемых отходов, %	Годовая прибыль/убыток оператора, тыс. руб.
Текущее состояние	87,40 %	12,60 %	- 26 293
Текущее состояние + РСО	87,40 %	12,60 %	1 891
Концессия	22,10 %	77,90 %	2 599 162
Концессия с закрытием двух полигонов	17,70 %	82,30 %	2 089 263

Источник: Результаты расчетов авторов

зовании потенциала утилизации ТКО и получении из них вторичных ресурсов, что является одной из ключевых задач реформы в этой сфере.

Согласно оптимальному решению 26 из 28 объектов обращения эксплуатируются на максимуме своей мощности. На 10,4 % оказался не полностью загружен полигон «Левобережный», а также полностью невостребованной оказалась площадка переработки отходов ООО «ГОФРА КОЛЛЕКТИВ», оборудование которой позволяет выделять только макулатуру, что делает нерентабельным доставку ТКО на данный объект. 954,2 тыс. тонн отходов оказались захоронены на полигонах ТКО и только 137,4 тыс. тонн (12,6 % общего образования отходов) были обработаны на специальных площадках для выделения вторсырья. Этот показатель является достаточно низким (целевой показатель к 2030 году, указанный в (Ob utverzhdanii... ,2018), составляет 80 %) и свидетельствует о низком уровне развития альтернативных методов обращения с ТКО в регионе и значительным негативным влиянием образующихся отходов на окружающую среду. В первую очередь это связано с острой нехваткой мощностей по переработке, так как максимальная загрузка 6 из 7 текущих объектов сигнализирует об экономической привлекательности такого вида обращения с отходами.

Если в рамках текущего состояния сферы обращения с ТКО НСО дополнительно учесть отдельный сбор отходов, итоговым результатом оператора становится годовая *прибыль* в размере 1,9 млн руб., что на 28,2 млн руб. больше, чем при расчетах без учета РСО. Таким образом, РСО позволил оператору не только достичь безубыточности, но и добиться положительного финансового результата своей деятельности. Все 19,8 тыс. тонн РСО были отправлены на переработку на три существующие предприятия, что подтверждает гипотезу о ценности РСО как источника вторичного сырья и нецелесообразности размещения отсортированных отходов на полигонах. Смешанные отходы были распределены аналогично исходному сценарию без РСО:

6 из 7 объектов переработки и 20 из 21 полигонов эксплуатируются на максимальном уровне своей годовой мощности. Стоит, однако, отметить, что рост массы перерабатываемых в регионе РСО не приводит к росту общего объема переработки, так как эта величина жестко ограничена сверху текущими небольшими мощностями по переработке в размере 137,4 тыс. тонн. При увеличении количества РСО смешанные отходы просто заменяются отдельно собранными на объектах переработки и отправляются на полигоны для захоронения. Таким образом, увеличение количества отдельно собираемых отходов само по себе лишь немного улучшает финансовый результат оператора, но не приводит к снижению негативного воздействия отходов на окружающую среду, для чего оказываются жизненно необходимыми новые мощности по переработке отходов.

Расчеты по модели в рамках текущего состояния сферы обращения с ТКО НСО продемонстрировали возможность получения достаточно точных оценок по объемам захоронения и переработки отходов в регионе, а также по финансовому результату деятельности оператора. Эти оценки позволяют вырабатывать наиболее подходящие значения единого тарифа для населения, определять наиболее востребованные и загруженные объекты инфраструктуры по обращению с ТКО региона, планировать транспортные маршруты движения отходов и разрабатывать варианты реформирования отрасли.

Также модель позволяет определить потенциал внедрения отдельного сбора отходов относительно повышения доходов оператора и снижения негативного влияния образующихся ТКО на экосистему региона.

Сценарий 2. Реализация концессии

Альтернативное направление развития сферы обращения с ТКО НСО представляет собой заключение концессионного соглашения между властями региона и региональным оператором, предполагающего создание в регионе двух крупных мусоросортировочных комплексов (МСК). В со-

ответствии с найденным в рамках такого сценария оптимальным решением концессионный МСК «Верх-Тула» оказался загружен на 405,3 тыс. тонн, «Раздольное» – на 432,5 тыс. тонн. По результатам расчетов из существующих объектов переработки остались задействованы (и при этом максимально загружены) только 3 с незначительным общим объемом переработки в 12,5 тыс. тонн ТКО в год. Невостребованными также оказались 8 полигонов захоронения отходов общей мощностью 23,2 тыс. тонн. Итоговым финансовым результатом деятельности оператора в рамках данного сценария стала прибыль в размере 2,6 млрд руб при предположении о неизменности цен на реализуемое вторсырье. Данное предположение с учетом больших объемов реализации выглядит несколько нереалистичным и требует дополнительных исследований рынков вторсырья.

Такое значительное улучшение финансового результата по сравнению с базовым сценарием достигается во многом за счет кратного роста объемов выделения и реализации вторсырья, что, в свою очередь, стало возможным благодаря вводу новых крупных мощностей по обработке отходов в виде двух МСК. Так, в исходном сценарии на обработку для выделения полезных фракций отправляется 137,4 тыс. тонн отходов, в концессионном – 850,3 тыс. тонн. Такой рост обработки ТКО приводит к пропорциональному росту доходов от реализации вторсырья более чем в 6 раз: с 201,5 млн руб. до 1,25 млрд руб.

Вторым важным фактором, обеспечивающим кратный рост прибыли регионального оператора при реализации концессии, является почти двукратное сокращение транспортных издержек с 2,7 млрд руб. до 1,5 млрд руб. за счет локализации основных процессов по обращению с ТКО на двух крупных комплексах без необходимости задействовать удаленные полигоны для размещения ТКО.

Таким образом, концессионный вариант развития системы обращения с ТКО имеет право на существование, так как при его реализации достигается существенно

более высокий показатель доли перерабатываемых отходов в регионе (77,9 %), а также положительный финансовый результат, что говорит о движении в сторону экологической и экономической эффективности. В первую очередь такой результат объясняется появлением в регионе необходимых мощностей по переработке отходов, на которых к тому же выполняется требование минимальной загрузки в 400 тыс. тонн для каждого МСК.

Одной из главных целей реализации концессионного соглашения в Новосибирской области является закрытие двух крупнейших полигонов области – «Левобережного» и «Гусинобродского». Эти полигоны уже достаточно давно функционируют на пределе своих мощностей, негативно влияют на расположенный вблизи них жилой фонд, испытывают проблемы с пожарами. В результате расчетов по концессионному сценарию полигон «Левобережный» оказался загружен на 42,9 тыс. тонн ТКО в год, а «Гусинобродский» – на 33,7 тыс. тонн, что существенно ниже текущих показателей. Однако полигоны не были полностью исключены из системы обращения с отходами НСО, поэтому было принято решение оценить последствия их полного закрытия. В результате проведения расчетов без участия двух данных полигонов на 48,5 тыс. тонн отходов увеличился объем переработки отходов на МСК «Верх-Тула», а также объем захоронения до максимальных мощностей на полигонах «Криводановка» (+13 тыс. тонн), «Каргатский» (+10,6 тыс. тонн) и «Татарский» (+4,5 тыс. тонн). Объем обращения на остальных объектах региона сохранился без изменений. Итоговая годовая прибыль оператора снизилась на 509,9 млн руб. и составила 2,1 млрд руб. Можно сделать вывод, что концессия позволяет решить задачу закрытия двух крупнейших полигонов области с сохранением положительной рентабельности деятельности оператора, что очень важно для долгосрочной устойчивости системы. Снижение годовой прибыли по сравнению с вариантом с сохранением этих двух полигонов связано с увеличением транспорт-

ных затрат на 591,4 млн руб. и вынужденным увеличением объема переработки ТКО на МСК «Верх-Тула» выше уровня минимальных средних издержек. Однако видится целесообразным отказ от части прибыли оператора для закрытия двух полигонов, что окажет существенное положительное влияние на состояние окружающей среды в регионе.

Необходимо заметить, что за рамками модели остается выбор оптимального местоположения новых объектов по обращению с отходами в регионе и влияние этого местоположения на расположенные рядом экосистемы и жилой фонд. Во многом из-за этого влияния реализация концессионного соглашения в исходном виде была прекращена властями Новосибирской области, которые начали процедуру перезапуска концессии на новых условиях.

Расчеты по концессионному варианту показали, что модель позволяет успешно планировать строительство в регионе новых объектов обращения с отходами, определять их оптимальное местоположение, мощность, а также оценивать сроки окупаемости подобных инвестиционных проектов. В дополнение к этому становятся доступными оценки по объему производимого вторсырья в регионе, что делает возможным планирование его сбыта и настройку цепочек поставок переработанных отходов. Также модель дает возможность

планировать работы по ликвидации и рекультивации устаревших полигонов субъекта для повышения качества окружающей среды и уровня жизни в расположенном рядом жилом фонде.

Предоставление скидки на тариф за осуществление РСО

Рассмотрим один из вариантов стимулирования раздельного сбора отходов среди населения, доступный властям НСО, а именно предоставление скидки на тариф за осуществление РСО. В рамках первого сценария (текущее состояние) при установке скидки на уровне 10 % общая масса образования раздельно собранных отходов в регионе увеличивается на 35 % – до 26,7 тыс. тонн в год. В результате предоставления скидки тарифные доходы снизились на 7,1 млн руб., однако итоговая прибыль оператора выросла до 3,3 млн руб. Таким образом, можно говорить о некотором *эффекте замены* тарифных доходов прибылью от реализации вторсырья. Так, при переходе от скидки 0 % к скидке 10 % за каждый потерянный рубль тарифных доходов оператор получил 1,2 руб. дополнительного дохода от реализации вторсырья. В таких условиях можно говорить о том, что оператору выгодно увеличивать скидку до тех пор, пока эффект замены не станет отрицательным, а государство благодаря этому увеличивает количество перерабаты-

Таблица 2. Результаты деятельности оператора при различных уровнях скидки за РСО
Table 2. The results of the operator's activity at various levels of discount for the separate waste collection

Скидка	Прибыль оператора, тыс. руб.	Масса перерабатываемых РСО, тыс. тонн
0 %	1 891,3	15,9
5 %	3 205,1	23,4
7,5 %	3 370,8	25,1
8,5 %	3 356,3	25,8
10 %	3 249,2	26,7
20 %	100,2	32,6
30 %	- 6 624,4	37,7
50 %	- 29 020,0	46,1
100 %	- 114 487,4	60,6

ваемых в регионе отходов. В табл. 2 представлены результаты деятельности сферы обращения с ТКО НСО при различных значениях скидки за РСО.

Как можно заметить, оптимальный уровень скидки с точки зрения максимизации прибыли оператора находится между 5 и 8,5 %, далее при увеличении скидки финансовый результат снижается. Также рассмотрены предельные уровни скидки в размере 50 % и 100 %, при которых, с одной стороны, достигается существенное увеличение массы перерабатываемых РСО, но с другой стороны, наблюдается значительный убыток от деятельности оператора, что делает систему финансово неустойчивой.

Таким образом, модель дает возможность успешно проверять гипотезы о влиянии различных мер государственного регулирования отрасли для достижения стратегических целей общества. Помимо рассмотренной скидки за осуществление РСО могут быть проверены такие инструменты воздействия, как ограничение по объему захоронения отходов, дополнительные налоги и сборы на захоронение, государственные закупки вторсырья, субсидирование цен на переработанные отходы. Все эти меры могут быть включены в расчеты по модели, что дает возможность выбора оптимального набора мер государственного регулирования отрасли для формирования стратегии ее устойчивого развития в направлении экологической и экономической эффективности.

Заключение

Для количественного и качественно обоснования структурных изменений

в сфере обращения с ТКО в регионах России авторами предложена агентская модель, позволяющая избежать недостатков и ограничений, существующих в современных подходах в данной области. Разработанная модель позволяет получать достоверные оценки деятельности участников отрасли обращения с отходами, в равной степени учитывая аспекты экономической устойчивости и экологической эффективности системы.

Апробация подхода на примере Новосибирской области показала, что недостаточный уровень единого тарифа и недополучение доходов от реализации вторсырья приводят к убыткам регионального оператора и финансовой несбалансированности системы. Одним из главных сдерживающих факторов развития переработки ТКО оказалась существенная нехватка мощностей в регионе. При этом развитие отдельного сбора отходов без ввода таких дополнительных мощностей приводит лишь к небольшому улучшению экономической составляющей, но не снижает негативного влияния ТКО на экосистему региона. Концессионный вариант, особенно со стимулированием РСО и вложениями в соответствующую инфраструктуру, видится оптимальным с точки зрения достижения экологических целей и финансовой устойчивости системы. Стимулирование государством отдельного сбора отходов, например, через предоставление скидки на единый тариф, может являться эффективным методом увеличения объемов переработки, но только в совокупности с расширением инфраструктуры для РСО.

Список литературы / References

Askhakova F. Kh. Vektornaia optimizaciia v balansovoi modeli Lenont'eva – Forda, uchityvaiushchei utilizaciiu vrednykh otkhodov [Vector optimization in the Lenontiev-Ford balance model, which takes into account the disposal of hazardous waste]. In: *Izvestiia Rossiiskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A. I. Gercena [Proceedings of the Russian State Pedagogical University]*, 2007, 45, 30–33.

Bartelings H., Dellink R., Van Ierland E. C. Modeling Market Distortions in an Applied General Equilibrium Framework: The Case of Flat-Fee Pricing in the Waste Market. In: *Economics of Industrial Ecology. Materials, Structural Change, and Spatial Scales*, 2004, 255–286.

Gilmundinov V.M., Rogachev N.S. Problemy ucheta ekologicheskoi i ekonomicheskoi effektivnosti pri modelirovanii sfery obrashcheniia s tverdymi kommunal'nymi otkhodami [Problems Of Accounting The Environmental And Economic Efficiency When Modeling The Sphere Of Municipal Solid Waste Management]. In: *Mir ekonomiki i upravleniia [World Of Economics And Management]*, 2021, 1, 72–85. DOI: <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2021-21-1-72-85>

Kopyrin A. Modelling of municipal solid waste utilisation market of a resort city. In: *E 3S Web of Conferences*, 2019, 91. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199104004>

Kostenko T.A., Petlina E.M. Dinamicheskaiia model' mezhotraslevogo balansa, uchityvaiushchaia vydelenie vrednykh otkhodov, i dvoistvennaia k nej model' [Dynamic model of intersectoral balance, taking into account the release of hazardous waste, and its dual model]. In: *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Estestvennye nauki [News of higher educational institutions. North Caucasian region. Natural Sciences]*, 2008, 2, 11–16.

Koushik P., Subhasish C., Amit D., Akhouri P.K., Subhabrata R. A comprehensive optimization model for integrated solid waste management system: A case study. In: *Environmental Engineering Research*, 2019, 24(2), 220–237. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2018.132>

Li G., Masui, T. Assessing China's Waste Management Activities Using a Computable General Equilibrium Model. In: *Chemical Engineering Transactions*, 2018, 63, 67–72. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1863012>

Li Y.P., Huang G.H., Nie S.L. A mathematical model for identifying an optimal waste management policy under uncertainty. In: *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36, 2658–2673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.049>

Miyata Y. A General Equilibrium Analysis of the Waste-Economic System – A CGE Modeling Approach. In: *Infrastructure Planning Review*, 1995, 12, 259–270. DOI: <http://dx.doi.org/10.2208/journalip.12.259>

Ob utverzhdenii Strategii razvitiia promyshlennosti po obrabotke, utilizacii i obezvrezhivaniuu otkhodov proizvodstva i potrebeniia na period do 2030 goda [On approval of the Strategy for the development of industry for the processing, recycling and neutralization of production and consumption waste for the period up to 2030]. 2018. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/556353696> (accessed 10 February 2022).

Okushima S., Yamashita, H. A General Equilibrium Analysis of Waste Management Policy in Japan. In: *Hitotsubashi Journal of Economics*, 2005, 46(1), 111–134.

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. In: *The National Institute of Economic Research Working Paper*, 2010, 118.

Rabbani M., Mokhtarzadeh M., Farrokhi-Asl H. A New Mathematical Model for Designing a Municipal Solid Waste System Considering Environmentally Issues. In: *International Journal of Supply and Operations Management*, 2018, 5, 234–255. DOI: 10.22034/2018.3.4

Shirazi M.A., Samieifard R., Abduli M.A., Omidvar B. Mathematical modeling in municipal solid waste management: case study of Tehran. In: *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2016, 14(8). DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s40201-016-0250-2>

Soukopová J., Kalina J. Mathematical model of economics of municipal waste management. *Proceedings of 30th International Conference Mathematical Methods in Economics*. Karviná, Czech Republic, 2012, 30, 823–829.

Velikanova T.V. Metody i modeli razmeshcheniia ob'ektov obrashcheniia s otkhodami v regione [Methods and models for the placement of waste management facilities in the region]. In: *Fundamental'nye issledovaniia [Fundamental research]*, 2013, 11, 1289–1293.

Приложение

Код для осуществления расчетов по модели в среде программирования R.

```
install.packages("ROI.plugin.qpoases")
require("ROI")
x<-OP(Q_objective(Q=Dmat, L=dvec), L_constraint(L=Amat, dir=dir, rhs = bvec), types =
NULL, bounds = NULL, maximum = TRUE)
opt <- ROI_solve(x, solver="qpoases")
opt
solution<-opt$solution
write.csv2(solution,"sol.csv")
```

Где:

Dmat – матрица коэффициентов при квадратичных переменных;
Dvec – матрица коэффициентов при линейных переменных;
Amat – матрица коэффициентов при переменных в ограничениях;
dir – вектор, содержащий направления ограничений;
bvec – вектор, содержащий правые части ограничений.