

УДК 628.4

ПРОГНОЗ ВОСТРЕБОВАННОСТИ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ И ОБЪЕМОВ ВЫВОЗКИ ОТХОДОВ НА ОБЪЕКТЫ ОБРАЩЕНИЯ

Чилингер Лилия Наримановна¹,
lilichilinger@gmail.com

Латин Олег Вячеславович²,
latin.ov@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Акционерное общество «Красноярское Аэрогеодезическое предприятие»,
Россия, г. Красноярск, ул. Иртышская, 2а.

Актуальность исследования обусловлена анализом общей необходимости выделения земельных участков под строительство полигонов для захоронения твердых коммунальных отходов в будущем в контексте внедрения новой системы обращения с отходами в Российской Федерации, при которой объекты захоронения (полигоны захоронения твердых коммунальных отходов) не являются приоритетными.

Цель исследования заключается в определении ожидаемых результатов мероприятий, предпринятых в рамках новой системы обращения с отходами, в отношении объектов размещения и в расчёте общей площади земельного участка, которая должна быть сформирована для размещения объема твердых коммунальных отходов в 2024 г.

Объекты: объемы образования, вывозки и размещения твердых коммунальных отходов, площади земельных участков и численности населения.

Методы. Для прогнозирования объема используется метод статистического анализа колебаний временных рядов, его экстраполяция, расширение динамического диапазона с выравниванием по аналитической формуле, оценка погрешности метода и определение доверительных интервалов, аналитический и сравнительный анализ данных о предполагаемом вводе в эксплуатацию объектов по переработке твердых коммунальных отходов, математический расчет площади земельного участка с целью размещения определенного объема твердых коммунальных отходов.

Результаты. На основании прогноза образования отходов, ввода в эксплуатацию объектов инфраструктуры обращения с отходами до 2024 г. сделан вывод о перспективах востребованности земельных участков для организации полигонов. Объем твердых бытовых отходов увеличится и в 2024 г. рост может составить 5,46 % по сравнению с уровнем 2019 г. На основании анализа данных и информации об ожидаемом вводе объектов инфраструктуры предполагается, что к 2024 г. их относительная мощность должна быть перераспределена в пользу предприятий утилизации на 6,9 %. Несмотря на ожидаемое увеличение утилизации твердых отходов к 2024 г., прогнозируется увеличение мощности захоронения на 107,5 млн м³/год. Для ежегодного размещения дополнительных объемов твердых коммунальных отходов до 2024 г. государству необходимо выделить дополнительно 22171,9 га земель под организацию объектов захоронения.

Ключевые слова:

Государственный отчет, информация, открытые данные, площадь земельного участка, локация, масса отходов, полигоны, объемы твердых коммунальных отходов, экстраполяция, прогноз, твердые коммунальные отходы, анализ, ввод в эксплуатацию, государственные программы.

Введение

В современном мире подходы к решению проблем обращения с коммунальными и бытовыми отходами являются маркером достигнутого уровня развития стран и цивилизации в целом. Философия потребления генерирует товарное предложение, в котором само приобретение товаров является важнейшим видом человеческой деятельности. В процессе использования вещи постепенно теряют свои свойства, устаревают и в конечном счете оказываются в местах их сбора, накопления, обработки, утилизации, обезвреживания и размещения (захоронения). По данным совместного исследования международной группы ученых [1–5] в мире ежегодно образуется 2,01 млрд т твердых бытовых (коммунальных) отходов (ТКО) с прогнозом увеличения до 3,40 млрд т/год к 2050 г. Столь значительные цифры позволяют сделать вывод, что проблема обращения с твердыми коммунальными

отходами не является локальной или характерной для какого-то одного государства и его территории, а является новым вызовом глобального характера всему современному обществу [6].

Сегодня экологически чистые технологии обращения с отходами приобретают всё большую популярность. Озадаченные проблемой сохранения окружающей среды государства последовательно отказываются от практики захоронения отходов, вводя на своих территориях раздельный сбор, сортировку и утилизацию отходов.

На современном уровне развития технологий и цивилизации наиболее распространёнными являются три способа обращения с отходами: захоронение на полигонах, компостирование и утилизация на мусороперерабатывающих заводах с последующим сжиганием и получением электроэнергии [7]. Главным преимуществом захоронения на полигоне является

стоимость, которая в среднем в 2 раза ниже стоимости «сортировки или компостирования» [7]. Во многом именно по этой причине наиболее распространенным методом обращения с ТКО в Российской Федерации является их захоронение на полигонах [8].

В Российской Федерации для регулирования отношений в области обращения с отходами действует ФЗ [9], которым урегулированы правоотношения организации системы обращения и создания соответствующей инфраструктуры объектов обращения с ТКО.

Исследуя положения ФЗ [9], авторам стало известно, что главная цель существующего государственного регулирования – максимальное вовлечение отходов в переработку (утилизация). Данный вывод следует из ч. 2 ст. 3 ФЗ [9], где регламентирован приоритетный порядок в обращении с отходами, а именно с начала максимального использования исходных сырья и материалов и предотвращения образования отходов до обработки и утилизации отходов путем их сокращения и снижения класса опасности и обезвреживания [9]. Как мы видим, представленный в законе перечень направлений государственной политики является закрытым и строительство объектов размещения отходов (захоронения), которыми являются полигоны ТКО, не входят в него в качестве приоритетных государственных мероприятий.

Из различных источников известно, что площадь в РФ, занятая полигонами, увеличивается на 2,5–4 % ежегодно. Для нужд полигонов ТКО отчуждается около 10 тыс. га пригодных для использования земель [7]. В то же время некоторое количество земель занимают несанкционированные свалки, которые не имеют собственного учета и не входят в представленную статистику. Только по официальным данным [1] в 2019 г. в РФ до 131,3 тыс. га заняты полигонами отходов и свалками.

В Российской Федерации внедряется новая система обращения с отходами. Реализацией намеченных мероприятий планируется к 2030 г. достигнуть показателя снижения в два раза объема отходов, которые направляются на полигоны [10].

Для точного понимания сути происходящих изменений в сфере обращения с отходами, влияния этих изменений на состояние земельных ресурсов РФ необходимо выяснить – каким образом изменится площадь земель, занятая полигонами ТКО, в связи с внедрением новой системы обращения с отходами с учетом объективной тенденции роста количества ТКО [11].

Эволюция экономики и общества в современных условиях неразрывно связана с обеспечением её устойчивого развития. В этой связи подходы к решению проблем обращения с отходами, как правило, выражаются в необходимости взаимной увязки с целями устойчивого развития всех решений сферы управления и обеспечения жизнедеятельности общества различных уровней (локального, регионального и глобального) и иерархии территорий. Таким образом, увеличивается потребность не только в междисциплинарных исследованиях, но и в комплексных

межотраслевых подходах для разработки соответствующих решений [12]. Начальным элементом такого подхода может являться предметный анализ существующих данных официальной отчетности, в том числе данных государственного статистического наблюдения.

Настоящая работа представляет собой междисциплинарное исследование регионального уровня, проведенное на основе открытых данных [1–4] и данных о планируемом вводе в эксплуатацию инфраструктурных объектов обращения с отходами, содержащихся в государственных программах [13, 14].

Исследование опирается на действующие нормативные и методические документы в области защиты окружающей среды, природопользования и землеустройства [9, 10, 13–17]. В процессе исследования использованы общенаучные методы логического анализа, обобщения, сравнения, группировки, а также специальный метод прогнозирования возможных значений на основе статистического анализа колебаний динамического ряда для объемов вывозки ТКО.

По результатам выполненной работы получены прогнозные и ожидаемые значения:

- объемов вывозки ТКО на объекты инфраструктуры обращения с отходами на 2024 г.;
- объема и массы ТКО, образуемых человеком на территории Российской Федерации в год;
- параметров инфраструктуры объектов обращения с ТКО на 2024 г.;
- объема отходов, подлежащих размещению на полигонах ТКО в 2024 г.;
- площади земель, которые должны быть отведены под строительство объектов размещения ТКО в 2024 г.

Сделаны выводы о характере и достаточности планируемых мероприятий в области обращения с ТКО до 2024 г., а также ожидаемой востребованности земельных ресурсов и площадей территории РФ под отводимые полигоны ТКО.

Методы и материалы

Согласно данным Государственного доклада в Российской Федерации в период с 2010 по 2019 гг., количество отходов производства и потребления увеличилось на 69 млн м³ (табл. 1) [3].

Таблица 1. Распределение по годам объема ТКО, вывозимых на объекты обработки, утилизации и размещения, млн м³

Table 1. Distribution by years of the volume of solid municipal waste (SMW) transported to facilities for treatment, utilization and disposal, million m³

Объемы вывозки ТКО от объектов образования по годам, данные Государственного доклада в млн м ³ Volumes of SMW removed from educational facilities by years, data from the State Report, million m ³									
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
235,4	241,1	255,8	260,9	262,8	266,5	268,8	274,4	275,4	304,4

Для построения прогноза и определения вероятных значений признака в будущем до 2024 г. используем метод статистического анализа колебаний дина-

мического ряда объемов вывозки ТКО на основе данных за 2010–2019 гг.

Выравнивание по аналитической формуле в настоящее время является наиболее распространенным способом экстраполяции рядов динамики, который отображает общую тенденцию изменения (рис. 1).

Путем построения гистограммы (столбчатой диаграммы) с добавлением линии тренда в программе «Excel» осуществляется подбор функции.

Полученная линейная функция $y=5,948x+231,8$ описывает линию тренда в пределах представленного динамического ряда, отображающего тенденцию из-

менения объемов образуемых и вывозимых отходов в периоде с 2010 по 2019 гг. в зависимости от года наблюдения.

Линия тренда и коэффициент детерминации $D=R^2$ (величина достоверности аппроксимации) также отображены на диаграмме для анализа уравнения на достоверность. Если коэффициент детерминации (R^2) больше 0,70, такая функция может быть использована для анализа полученных материалов. Если данное условие не выполняется, то необходимо продолжить подбор построения линии тренда экспоненциальной, полиномиальной, логарифмической или степенной функциональной модели.

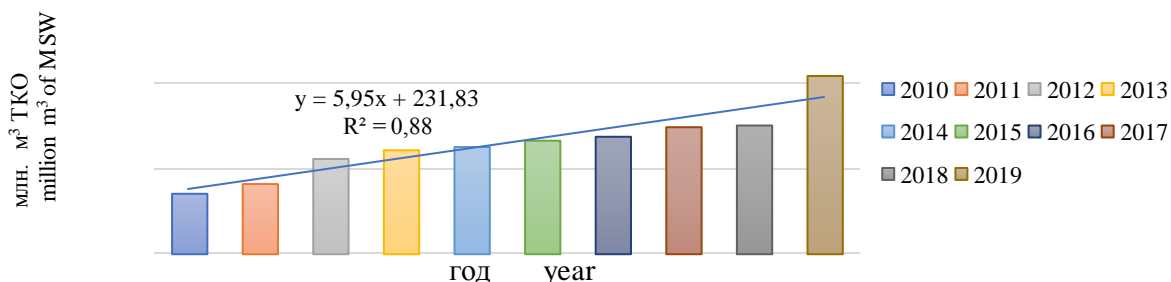


Рис. 1. Гистограмма распределения по годам объема ТКО, вывозимых на объекты обработки, утилизации и размещения, млн м³

Fig. 1. Histogram of distribution by years of the volume of SMW transported to processing, utilization and disposal facilities, million m³

Таблица 2. Расчёт оценки ошибки метода
 Table 2. Calculation of method error estimate

Уровни динамического ряда Time series levels	Индекс года t Year index t	Фактическое значение, Yф Actual value, Yф	Теоретическое значение, Yт Theoretical value, Yт	Yф-Yт	(Yф-Yт)2	(t-tc)2
2010	1	235,4	237,7	-2,3	5,5	20,25
2011	2	241,1	243,7	-2,6	6,7	12,25
2012	3	255,8	249,6	6,2	37,9	6,25
2013	4	260,9	255,6	5,3	28,2	2,25
2014	5	262,8	261,5	1,3	1,6	0,25
2015	6	266,5	267,5	-1,0	1,0	0,25
2016	7	268,8	273,4	-4,6	21,5	2,25
2017	8	274,4	279,4	-5,0	24,8	6,25
2018	9	275,4	285,3	-9,9	98,6	12,25
2019	10	304,4	291,3	13,1	172,1	20,25
сумма total	55	2645,5	2645	25,9	397,9	82,5
среднее average	5,5	264,55	264,5	6,475	39,79	15

Примененная методика статистического прогноза основывается на анализе и экстраполяции (продлении) рядов динамики данных об отходах в прошедшем периоде и может быть осуществлена несколькими способами [18, 19]. Однако вне зависимости от выбранного способа суть метода заключается в предположении о том, что закономерности или тенденции изменения изучаемого объекта (явления) в прошлом сохраняются на определенном отрезке времени в будущем.

Срок, не превышающий 1/3 базисного периода, считается наиболее точным для прогноза методом экс-

траполяции [20]. Причем период прогнозирования не должен превышать базисный период. В этой связи для прогноза данным методом необходимо тщательное и детальное изучение длительных рядов динамики, что позволит выявить долгосрочную тенденцию изменения, причем в достаточно стабильных условиях. В нашем случае для исследования информация по объёму вывозки представлена за период с 2010 по 2019 гг., в этой связи относительно корректный прогноз может быть предоставлен на период не далее 2024 г.

В действительности допускается изменение тенденции развития, поэтому данные, полученные путем экстраполирования, необходимо рассматривать как вероятностные. Поэтому необходимо произвести оценку ошибки метода (табл. 2) и определить доверительные интервалы.

Для построения доверительного интервала прогноза последовательно, используя формулу (1), рассчитываем:

- величину (C), представляющую собой среднеквадратическое отклонение от линии тренда (стандартную ошибку)

$$C = \sqrt{\frac{\sum(Yф - Yт)^2}{n - p}} = \sqrt{\frac{398,0}{10 - 2}} = 7,05; \quad (1)$$

- коэффициент Стьюдента (G)= $(t_{ст-критическое})=1,86$ выбираем из табл. 2, для уровня значимости (доверительной вероятности)=(0,1), при числе степеней свободы для линейной модели из двух параметров $(n-p)=(8)$, или получаем через функцию Excel =СТЮДРАСПОБР (0,1;8)=1,86;
- границы доверительных интервалов (Yd), для каждого года определяем из формул (2), (3):

- для нижней границы

$$Yd = Yt - M \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(t-tc)^2}{\sum_{i=1}^n (t-tc)^2}}; \quad (2)$$

- для верхней границы

$$Yd = Yt + M \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(t-tc)^2}{\sum_{i=1}^n (t-tc)^2}}. \quad (3)$$

Подставляя в формулы и табл. 3 вычисленные значения, продолжим построение динамического ряда от индекса года (t) и, таким образом, рассчитаем теоретические объёмы (Yt) и доверительные интервалы (Yd) для заданного значения доверительной вероятности (табл. 3).

Полученные данные модели и её доверительного интервала представим в виде точечной диаграммы (рис. 2).

Таблица 3. Прогноз объёмов вывозимых ТКО (млн м³) методом экстраполяции

Table 3. Forecast of the volumes of removed SMW (million m³) by the extrapolation method

Прогнозирование Forecasting	Индекс года Index of the year	Вид математической функции Type of mathematical function	Параметры Parameters	Фактический объём $Y_{ф}$, м ³ Actual volume $Y_{ф}$, m ³	Теоретический объём, (Yt) Theoretical volume, (Yt)	Коэффициент Стьюдента (G) Student's coefficient (G)	Оценка ошибки метода, (C) Method error estimate, (C)	Интервальная оценка, (M)(M=G*C) Interval assessment, (M)(M=G*C)	Доверительный интервал (Yd) Confidence interval (Yd)	
									от	до
Год/Year										
2020	11	$Yt = A * x + B$	5,95 231,83	304,40	297,23	1,86	7,05	13,12	281,34	313,11
2021	12				303,18				286,52	319,83
2022	13				309,12				291,62	326,63
2023	14				315,07				296,64	333,51
2024	15				321,02				301,59	340,45

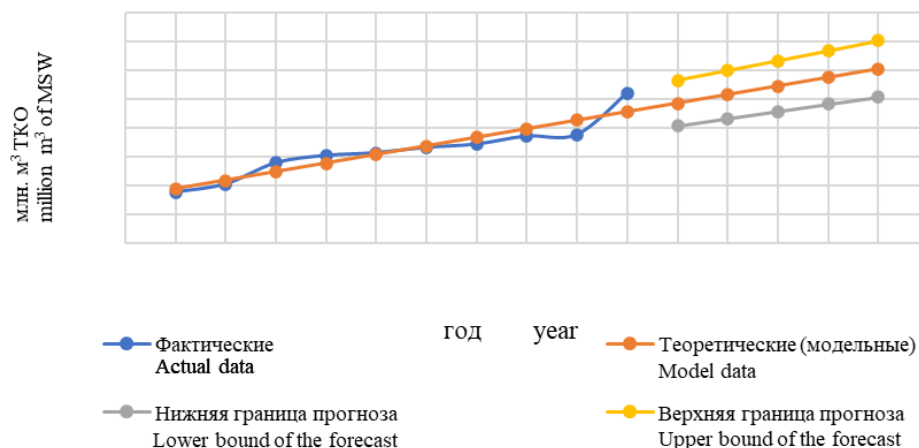


Рис. 2. Графическое отображение расчётных данных, млн м³

Fig. 2. Graphic display of calculated data, million m³

Таблица 4. Проверка значимости параметров модели

Table 4. Checking the significance of model parameters

$y = b_0 + b_1 * t$		
Параметр модели/Model parameter	b_1	b_0
Значения параметра/Parameter values	5,95	231,83
Ошибка определения параметра Parameter definition error	0,77	4,82
$t_{\text{расчетный}} =$ Значения параметра Ошибка определения параметра $t_{\text{расчетный}} =$ Parameter values Parameter definition error	7,66	48,12

Размеры доверительного интервала зависят от ряда факторов: качества модели, значимости параметров, степени её близости к фактическим данным, числа наблюдений и уровня значимости.

Проведём проверку значимости параметров модели с использованием функции Excel =ЛИНЕЙН (табл. 4).

Гипотеза (H_0) – если $t_{\text{расчетный}}$ Критерий Стьюдента меньше или равен $t_{\text{критическое}}$, определенному через функцию Excel=СТЮДРАСПОБР, для уровня значимости (0,1), значит, параметр незначим и им можно пренебречь. Гипотеза (H_1) – если $t_{\text{расчетный}}$ Критерий Стьюдента больше $t_{\text{критическое}}$, значит, параметр значим.

В нашем случае оба полученных критерия оцениваемого параметра линейной модели $t_{\text{расчетное}} = b_1 = 7,66$ и $t_{\text{расчетное}} = b_0 = 48,12$ больше, чем $t_{\text{критическое}} = 1,86$. Следовательно, принимается альтернативная гипотеза (H_1) и оба параметра являются значимыми, и можно

утверждать, что с доверительной вероятностью 0,1 в 2024 г. объём ТКО, вывозимых на объекты сортировки, утилизации и размещения, составит приблизительно 321,02 млн м³ в доверительном интервале от 301,59 до 340,45.

Следующим элементом исследования являются данные Государственного доклада о существующей инфраструктуре объектов обращения на 2019 г., а также данные об ожидаемом вводе в эксплуатацию объектов обращения до 2024 г.

Согласно Государственному докладу [3], инфраструктура объектов обращения с отходами в 2020 г. в РФ была представлена объектами обработки, утилизации и размещения (табл. 5).

Полученные цифры (табл. 5) показывают, что мощности объектов утилизации в общей инфраструктуре объектов обращения с отходами уже в 2019 г. были способны утилизировать 124,5 млн м³ ТКО. При этом фактическая утилизация ТКО в 2019 г. [3] составила 2,7 млн т, или 13,5 млн м³. Данных по захоронению ТКО в 2019 г. Государственный доклад [3] и сведения Росприроднадзора [2] не представляют.

Таблица 6. Распределение по объектам утилизации и размещения объемов вывозки ТКО за 2019 г.

Table 6. Distribution by disposal facilities and placement of volumes of SMW removal in 2019

Всего ТКО в 2019 г. Total SMW in 2019		%	Утилизировано фактически в год Actually disposed, per year		%	Мощность объектов размещения, в год Accommodation capacity, per year		%	Неустановленные объекты Unidentified objects		%
млн т million tons		100	млн т million tons		4,4	млн т million tons		75,3	млн т million tons		20,3
61,1			млн м ³ million m ³			млн м ³ million m ³			млн м ³ million m ³		
304,4			2,7			46			12,4		
			13,5			230			60,9		

Таблица 7. Прогноз инфраструктурных мощностей объектов обращения с отходами в 2024 г., количество в год по данным открытых источников

Table 7. Forecast of infrastructure capacities of waste management facilities in 2024, quantities per year according to open sources

Год Year	Объекты/Facilities of					
	обработки отходов waste treatment		утилизации отходов waste disposal		размещения отходов waste dumping	
2024	71,15	млн т million tons	48,89*	млн т million tons	67,5	млн т million tons
	355,7	млн м ³ million m ³	244,4	млн м ³ million m ³	337,5	млн м ³ million m ³

* – приведённая цифра получена из сложения данных Государственного доклада о планируемом вводе в эксплуатацию объектов утилизации и данных, полученных в [13] и предусматривающих ввод в эксплуатацию объектов энергетической утилизации в Московской области и г. Казани.

* – the given figure was obtained from the addition of the data of the State Report on the planned commissioning of disposal facilities and data obtained [13] and operation of energy utilization facilities in the Moscow region and the city of Kazan.

Из анализа данных Государственного доклада [3] и федеральных государственных программ [13, 14] следует, что до 2024 г. (табл. 7) в основном силами федерального бюджета дополнительно к уже существующим мощностям должны быть введены в эксплуатацию объекты утилизации мощностью 225,2 млн м³/год.

Таким образом, если учесть приводимый за 2019 г. объём утилизации ТКО и мощность всех объектов размещения ТКО в 2019 г. (табл. 6) – 230 млн м³/год, становится понятно, что в 2019 г. не менее 20,3 %, или 60,9 млн м³/год, ТКО были вывезены на неустановленные объекты.

Таблица 5. Состояние инфраструктурных мощностей объектов обращения с отходами на 2019 г., количества в год (Государственный доклад за 2019 г.)

Table 5. State of infrastructure capacities of waste management facilities in 2019, quantities per year (State report for 2019)

Год Year	Объекты/Facilities of					
	обработки отходов waste treatment		утилизации отходов waste disposal		размещения отходов waste dumping	
2019	26,1	млн т million tons	24,9	млн т million tons	46,0	млн т million tons
	130,5	млн м ³ million m ³	124,5	млн м ³ million m ³	230	млн м ³ million m ³

За счёт бюджетов субъектов федерации и внебюджетных источников должны быть дополнительно введены в эксплуатацию мощности объектов размещения в общем объёме 107,5 млн м³/год.

Таким образом, совокупная мощность всех объектов обращения должна составить 581,9 млн м³/год без учета закрывающихся и ликвидируемых.

Учитывая представленные объёмы планируемых мероприятий по наращиванию мощностей на 107,5 млн м³/год объектов инфраструктуры обращения с отходами, можно рассчитать проектную площадь земель, которая подлежит отводу для размещения такого количества отходов и организации полигонов ТКО.

Согласно [15], проектирование, эксплуатация и рекультивация объектов размещения отходов организуется на срок не более 25 лет.

В соответствии с приложением 1 к инструкции 1996 г. [18] можно произвести расчёт площади полигона для средней высоты полигона 40 м.

Общую площадь (22171,9 га) земельного участка (S), которую необходимо отвести до 2024 г. под полигоны ТКО для наращивания мощности полигонов на 107,5 млн м³/год, можно рассчитать по формуле (4):

$$S = \left(3 \cdot \frac{V_{\text{отх}} \cdot 100}{H} \right) \cdot 1,1 \cdot 25 = \left(3 \cdot \frac{107,5 \cdot 100}{40} \right) \cdot 1,1 \cdot 25 = 22171,9 \text{ га}, \quad (4)$$

где z – коэффициент, учитывающий заложение внешних откосов 1:4; H – средняя высота полигона, равна 40 м; l_1 – коэффициент, учитывающий полосу вокруг участка складирования; $V_{отх}$ – ёмкость полигона 107,5 млн м³/год; 25 – двадцать пять лет предельный срок эксплуатации полигона.

Также можно определить общую достаточную площадь земель ($S=69609,4$ га), которая должна быть занята действующими объектами размещения ТКО с совокупной мощностью 337,5 млн м³/год.

$$S = \left(3 \cdot \frac{V_{отх} \cdot 100}{H} \right) \cdot 1,1 \cdot 25 = \\ = \left(3 \cdot \frac{337,5 \cdot 100}{40} \right) \cdot 1,1 \cdot 25 = 69609,4.$$

Исходя из декларируемого государством отношения к объектам обработки как объектам «предварительной подготовки отходов к их дальнейшей утилизации» [9] и сопоставив сведения, размещенные на сайте Росприроднадзора [2] об образовании, ТКО за 2019 г. – 61,1 т – с данными (табл. 1) общего объёма вывозки в 2019 г. – 304,4 млн м³/год – из Государственного доклада [3], получим средний вес одного метра кубического ТКО – 0,2 т.

Сопоставив данные по численности населения РФ в 2019 г. – 146,8 млн человек [4], с общим объёмом вывозки 2019 г., можем определить средний объём образования ТКО на человека в год по территории Российской Федерации – 2,07 м³/человека в год. Полученные значения кажутся важными в связи с возможностью их применения для подтверждения данных настоящего исследования и сравнения с аналогичными показателями в других странах. Показатели также могут выполнять функцию ориентира для расчета ожидаемых объёмов образования ТКО в региональных и муниципальных исследованиях.

Значение веса ТКО – 0,2 т/м³ – и объёма – 2,07 м³/человека в год – характерно для территории Российской Федерации, и может отличаться в исследованиях по другим странам. Например, используемый учеными Атырауского университета, г. Атырау, (Казахстан), вес 1 м³ ТКО составляет 0,3 т, а средний объём образования ТКО – 2,27 м³/человека в год [21]. Из данных, используемых в исследованиях ученых университета Удайна (Индонезия), объём ТКО, производимых каждым человеком в день, приблизительно равняется 3 л для больших городов и 2,5 л на человека в день для малых городов [22]. Из исследования международной группы ученых [5] в 2019 г. Европейский союз (ЕС) произвел в общей сложности 502 кг ТКО на душу населения. Весьма схожие данные образования ТКО на человека в год представлены в исследовании [23] в отношении отдельных стран Евросоюза: Бельгия – 409 кг; Болгария – 416 кг; Латвия – 438 кг; Венгрия – 385 кг.

Заключение

Важнейшая государственная функция, заключающаяся в обеспечении и гарантировании безопасности среды обитания, создании и поддержании благо-

приятных условий для сохранения жизни и здоровья человека, обеспечения его жизнедеятельности, должна быть определяющей при выборе площадок захоронения ТКО. Наиболее проблемными аспектами в области захоронения отходов являются относительная близость к урбанизированным территориям, а также значительные ограничения в эксплуатации в последующем данных земель после вывода из эксплуатации и рекультивации территории под такими объектами.

Для реализации намеченных целей в области обращения с ТКО в РФ приняты федеральные государственные программы, предусматривающие ввод в эксплуатацию инфраструктурных объектов обращения с отходами [13, 14].

Все вышеприведенные нормативные источники и планируемые федеральные мероприятия не предполагают разработку и финансирование вплоть до 2024 г. каких-то специальных мероприятий в области территориального планирования, проектирования строительства объектов размещения отходов. По сути, федеральный регулятор оставляет за рамками своего участия ТКО, направляемые для захоронения на объекты размещения.

Между тем полученные цифры позволяют утверждать, что до 2024 г. практика размещения отходов на полигонах будет продолжена. Инфраструктура объектов обращения будет расширяться, в том числе и за счёт строительства полигонов ТКО.

С учётом проанализированного материала и полученных данных можно сделать следующие выводы:

- при существующей тенденции объём ТКО будет увеличиваться, в 2024 г. он может составить в среднем 321,02 млн м³ (доверительный интервал от 301,59 до 340,45 млн м³), что составляет прирост 5,46 % к уровню 2019 г.;
- существующая инфраструктура обращения с отходами 2019 г. выглядит следующим образом: 35,1 % – объекты утилизации и 64,9 % – полигоны ТКО;
- прогнозируемая инфраструктура обращения с отходами в 2024 г. должна выглядеть следующим образом: 42 % – объекты утилизации и 58 % – полигоны ТКО;
- в период с 2019 по 2024 гг. структура объектов обращения с отходами изменится незначительно, предполагается перераспределение относительной мощности в пользу утилизации на 6,9 %;
- по состоянию на 2019 г. при общем объёме вывозки отходов ТКО в 304,4 млн м³ дефицит объектов инфраструктуры отсутствует. Между тем инфраструктура утилизации, рассчитанная на 124,5 млн м³, используется для утилизации 13,5 млн м³, что составляет 10,8 % от её годовой мощности;
- для достижения программных целей по наращиванию на 107,5 млн м³/год объёмов размещения отходов на полигонах ТКО к 2024 г. государство должно выделить дополнительно 22171,9 гектаров земель под организацию объектов размещения ТКО;

- кроме категории утилизации и захоронения выявлена категория объектов, на которые в 2019 г. вывезено 20,3 %, или 60,9 млн м³, ТКО. Предположительно, данную категорию могут представлять объекты, не отвечающие обязательным требованиям и не включенные в Государственный реестр объектов размещения отходов [18], но продолжающие принимать отходы.

В рамках новой системы обращения с отходами запланированные к реализации мероприятия по наращиванию мощностей объектов размещения к 2024 г. приведут к увеличению площадей, занимаемых полигонами ТКО.

В этой связи следует ожидать, что востребованность в геoinформационном обеспечении деятельности по территориальному планированию, землеустройству, поиску, выбору мест и земельных участков для «обоснования предлагаемых геопространственных решений» [24] размещения полигонов ТКО к 2024 г. будет возрастать. В ближайшие годы полигоны ТКО, как объекты размещения, по-прежнему остаются востребованными объектами обращения с отходами.

Исходя из понимания перспектив дальнейшего строительства полигонов ТКО, продолжительного характера работы данных объектов и их относительной приуроченности к урбанизированным территориям, следует уделить внимание разработке методики

определения перспективных территорий для размещения таких объектов на основе принципов «рационального использования природных ресурсов» и их взаимосвязи с природными экосистемами [25]. Знание и учет природных факторов и экологической обстановки территории являются ключевыми факторами при выборе рационального направления использования земель, прогнозе дальнейшего развития территории, а также обеспечении экологической безопасности [26].

Учитывая, что ТКО, как сыпучие материалы, достаточно сложно поддаются точному учету [27], требуется разработка собственной согласованной методологии учёта образования, вывозки [28], контроля объёмов ТКО на полигонах на основе современных геопространственных решений сочетания геодезического и фотограмметрического методов [29–31].

Настоящее исследование представляет собой обобщённый анализ, основанный на открытых данных официальной отчетности государственных органов власти РФ. Исследование описывает положения дел в отрасли обращения с отходами и помогает сформировать представление о направлении государственного регулирования, прогнозе объёмов образования ТКО и необходимой площади земель для их размещения. Исследование может быть использовано при принятии решений в рамках реализации новой системы обращения с отходами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии Российской Федерации. URL: <https://rosreestr.gov.ru/site/activity/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-rossiyskoy-federatsii/> (дата обращения 01.04.2023).
2. Сведения об образовании, обработке, утилизации отходов производства и потребления за 2019 год, представленные региональными операторами, осуществляющими деятельность с твердыми коммунальными отходами 2 ТП (отходы) за 2019 год файл XLSX 14,57 Kb. URL: <https://rpn.gov.ru/activity/regulation/help/> (дата обращения 01.04.2023).
3. Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: <https://www.mnr.gov.ru/> (дата обращения 01.04.2023).
4. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781> (дата обращения 01.04.2023).
5. Predictive analysis of municipal solid waste generation using an optimized neural network model / N. Elshaboury, M.E. Abdelkader, A. Al-Sakaf, G. Alfalah // *Processes*. – 2021. – V. 9. – № 2045. URL: <https://doi.org/10.3390/pr9112045> (дата обращения 01.04.2023).
6. Kolekar K.A., Hazrab T., Chakrabarty S.N. Review on prediction of municipal solid waste generation models // *Procedia Environmental Sciences*. – 2016. – № 35. – P. 238–244. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.087> (дата обращения 01.04.2023).
7. Курбатова А.И., Харламов М.Д. Твердые отходы: технологии утилизации, методы контроля, мониторинг. 1-е изд. – М.: Издво «Юрайт», 2017. – 231 с.
8. Sereda T. Study of the morphological composition of municipal solid waste in the Perm region // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – № 677. 042080. URL: https://www.researchgate.net/publication/350080257_Study_of_the_morphological_composition_of_municipal_solid_waste_in_the_Perm_region (дата обращения 01.04.2023).
9. Об отходах производства и потребления. Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ. С изменениями на 07.04.2020 г. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/ (дата обращения 01.04.2023).
10. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года. Указ Президента РФ 21.07.2020 № 474. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_357927/ (дата обращения 01.04.2023).
11. Glushkov D., Kuznetsov G., Paushkina K. Switching coal-fired thermal power plant to composite fuel for recovering industrial and municipal waste: combustion characteristics, emissions, and economic effect // *Energies*. – 2020. – V. 13. – № 259. – 042080. URL: <https://doi.org/10.3390/en13010259> (дата обращения 01.04.2023).
12. Карпик А.П. Современное состояние и проблемы геoinформационного обеспечения территорий // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2012. – № 2. – С. 3–8.
13. Снижение негативного воздействия на окружающую среду посредством ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде и снижения доли захоронения твердых коммунальных отходов. Паспорт приоритетного проекта, утв. президентом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и приоритетным проектам, протокол от 21.12.2016 № 12. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216317/ (дата обращения 01.04.2023).
14. Экология. Паспорт национального проекта, утв. президентом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24.12.2018 № 16. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_316096/ (дата обращения 01.04.2023).
15. Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектное задание, эксплуатация и рекультивация. Свод правил СП 320.1325800.2017, утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 17.11.2017 № 1555/пн. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=STR&n=21871#GzQ9gzS7MDZbjWVU> (дата обращения 01.04.2023).
16. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов. Утв. Минстром России 02.11.1996. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_146721/03a2be231a770df1c965eed2cf766d4b6d4b50e3/ (дата обращения 01.04.2023).

17. Об утверждении Порядка ведения государственного кадастра отходов. Приказ Минприроды России от 30.09.2011 № 792. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121841/ (дата обращения 01.04.2023).
18. Cubillos M. Multi-site household waste generation forecasting using a deep learning approach // *Waste Management*. – 2020. – V. 115. – P. 8–14. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.046> (дата обращения 01.04.2023).
19. Atul K., Samadder S.R. An empirical model for prediction of household solid waste generation rate – a case study of Dhanbad, India // *Waste Management*. – 2017. – V. 68. – P. 3–15. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.034> (дата обращения 01.04.2023).
20. Шалдунова Н.П., Денисова Н.С., Кирик Д.А. Математическая обработка земельно-кадастровой информации. – Пермь: М-во с.-х. РФ, ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2015. – 73 с.
21. Forecast of solid waste generation in Atyrau region / M.S. Yessenamanova, R. Salykhov, A.E. Tlepbergenova, Zh.S. Yessenamanova, N.R. Tauova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – № 1889. – 032010. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/3/032010.
22. Sudiarta G. A. W., Suyasa I. W. B. Analysis of land requirements of Temesi final disposal facility, Gianyar Regency with 3R waste management scenario // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – № 623. – 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/623/1/012001.
23. Osazee I. Landfill in a sustainable waste disposal // *Terra Nova*. – 2021. – № 2 (4). – P. 67–74. DOI: 10.24018/ejgeo.2021.2.4.165.
24. Карпик А.П. Перспективы развития геодезического и картографического производства и новая парадигма геопространственной деятельности // *Вестник СГУГиТ*. – 2020. – Т. 25. – № 2. – С. 19–29.
25. Жарников В.Б. Экологическая концепция рационального землепользования // *Гео-Сибирь*. – 2008. – Т. 2. – № 1. – С. 163–175.
26. Pasechnik E. Yu., Chilinger L. N. Development of the methods of environmental and sanitary-hygienic assessment of urbanized lands (on the example of the Ob-Tom interfluvium) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – V. 350. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012041.
27. Сравнение точности определения объемов сыпучих материалов по данным съемки с беспилотных летательных аппаратов и геодезическим измерениям / А.В. Комиссаров, Е.И. Аврунев, Х.К. Ямбаев, Е.П. Хлебникова // *Вестник СГУГиТ*. – 2019. – Т. 24. – № 4. – С. 70–77.
28. Kłojzy-Karczmarczyk B., Makoud S. Analysis of municipal waste generation rate in Poland compared to selected European countries // *Web of Conferences*. – 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171902025.
29. Drone technology in municipal solid waste management and landfilling: a comprehensive review / N. Sliusar, T. Filkin, M. Huber-Humer, M. Ritzkowski // *Waste Management*. – 2022. – V. 139. – P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.006> (дата обращения 01.04.2023).
30. Caio César de Sousa Mello, Daniel Henrique Carneiro Salim, Gustavo Ferreira Simões. UAV-based landfill operation monitoring: a year of volume and topographic measurements // *Waste Management*. – 2022. – V. 137. – P. 253–263. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.020> (дата обращения 01.04.2023).
31. Unmanned aerial vehicles for operational monitoring of landfills / T. Filkin, N. Sliusar, M. Ritzkowski, M. Huber-Humer // *Journal of Drones*. – 2021. – V. 5. – № 4. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/5/4/125> (дата обращения 01.04.2023).

Поступила: 12.04.2022 г.

Прошла рецензирование: 13.05.2023 г.

Информация об авторах

Чилингер Л.Н., кандидат технических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Латин О.В., инженер отдела полевого производства Акционерного общества «Красноярское Аэрогеодезическое предприятие».

UDC 628.4

FORECAST OF THE DEMAND OF SOLID MUNICIPAL WASTE POLYGONS BASED ON THE ANALYSIS OF OPEN DATA OF COMMISSIONING AND VOLUME OF WASTE REMOVAL TO DISPOSAL FACILITIES

Liliya N. Chilinger¹,
lilichilinger@gmail.com

Oleg V. Latin²,
latin.ov@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Joint Stock Company «Krasnoyarsk Aerogeodetic Enterprise»,
2a, Irtyshskaya street, Krasnoyarsk, 660056, Russia.

The relevance of the research is caused by the study of the general need to allocate land plots for organization of solid municipal waste polygons in the future in the context of the new waste management system being introduced in the Russian Federation, in which waste disposal facilities (solid municipal waste polygons) are not a priority.

The main aim is to determine the expected results of the measures taken within the framework of the new waste management system in relation to accommodation facilities and to calculate the total area of the land plot that should be formed to accommodate the volume of solid municipal waste in 2024.

Objects: volumes of formation, removal and closure of closed municipal waste, land area and population.

Methods. To predict the amount of training, the method of statistical analysis of fluctuations in time series, its extrapolation, expansion of the dynamic range with alignment according to the analytical formula, estimation of the method error and determination of confidence intervals are used. The essence of the method lies in the assumption that the patterns or tendencies of change of the studied object (phenomenon) in the past will persist for a certain period of time in the future. Analytical and comparative analysis of data on the proposed commissioning of facilities for the processing solid municipal waste; mathematical calculation of the area of a land plot for placing a certain volume of solid municipal waste were applied in the paper.

Results. Based on the forecast of waste formation, commissioning of waste management infrastructure facilities until 2024, conclusions are drawn about the prospects for the demand for land plots for organizing polygons. The volume of municipal solid waste will increase and in 2024 may grow by 5,46 % compared to the level of 2019. Based on the analysis of data and information on the expected commissioning of infrastructure facilities, it is assumed that by 2024 their relative capacity will be redistributed in favor of utilization enterprises by 6,9 %. Despite the expected increase in the disposal of solid waste by 2024, an increase in the disposal capacity is projected by 107,5 million m³/year. For the annual placement of additional volumes of solid municipal waste until 2024, the state must allocate an additional 22171,9 hectares of land for organizing disposal facilities.

Key words:

State report, information, open data, land plot, locations, waste mass, polygons, solid municipal waste volumes, extrapolation, forecast, solid municipal waste, analysis, commissioning, government programs.

REFERENCES

1. *Ofitsialny sayt Federalnoy sluzhby gosudarstvennoy registratsii kadastra i kartografii Rossiyskoy Federatsii* [Official website of the Federal Service for State Registration of Cadastre and Cartography of the Russian Federation]. Available at: <https://rosreestr.gov.ru/site/activity/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-ze-mel-rossiyskoy-federatsii/> (accessed 1 April 2023).
2. *Svedeniya ob obrazovanii, obrabotke, utilizatsii otkhodov proizvodstva i potrebleniya za 2019 god, predstavlenyye regionalnymi operatorami, osushchestvlyayushchimi deyatelnost s tverdymi kommunalnymi otkhodami 2 TP (otkhody) za 2019 god, fayl XLSX 14,57 Kb* [Information on the generation, processing, disposal of production and consumption waste for 2019, provided by regional operators operating with municipal solid waste 2 TP (waste) for 2019, XLSX file 14,57 Kb]. Available at: <https://rpn.gov.ru/activity/regulation/help/> (accessed 1 April 2023).
3. *Ofitsialny sayt Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii* [Official website of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation]. Available at: <https://www.mnr.gov.ru/> (accessed 1 April 2023).
4. *Ofitsialny sayt Federalnoy sluzhby gosudarstvennoy statistiki Rossiyskoy Federatsii* [Official website of the Federal State Statistics Service of the Russian Federation]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781> (accessed 1 April 2023).
5. Elshaboury N., Mohammed Abdelkader E., Al-Sakkaf A., Alfalah G. Predictive analysis of municipal solid waste generation using an optimized neural network model. *Processes*, 2021, vol. 9, no. 2045. Available at: <https://doi.org/10.3390/pr9112045> (accessed 1 April 2023).
6. Kolekar K. A., Hazrab T., Chakrabarty S. N. A review on prediction of municipal solid waste generation models. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, no. 35, pp. 238–244. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.087> (accessed 1 April 2023).
7. Kurbatova A.I., Kharlamova M.D. *Tverdyye otkhody: tekhnologii utilizatsii, metody kontrolya, monitoring* [Solid waste: disposal technologies, control methods, monitoring]. 1st ed. Moscow, Yuryayt Publ. House, 2017. 231 p.
8. Sereda T. Study of the morphological composition of municipal solid waste in the Perm region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, no. 677, 042080. Available at: https://www.researchgate.net/publication/350080257_Study_of_the_morphological_composition_of_municipal_solid_waste_in_the_Perm_region (accessed 1 April 2023).
9. *Ob otkhodakh proizvodstva i potrebleniya. Federalny zakon ot 24.06.1998 № 89-FZ c izmeneniyami na 07.04.2020* [On production and consumption waste. Federal Law of June 24, 1998, No. 89-FZ as amended on April 7, 2020]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/ (accessed 1 April 2023).

10. *O natsionalnykh tselyakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda. Ukaz Prezidenta RF 21.07.2020 № 474* [On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030. Decree of the President of the Russian Federation of July 21, 2020 No. 474]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_357927/ (accessed 1 April 2023).
11. Glushkov D., Kuznetsov G., Paushkina K. Switching coal-fired thermal power plant to composite fuel for recovering industrial and municipal waste: combustion characteristics, emissions, and economic effect. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 259, 042080. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13010259> (accessed 1 April 2023).
12. Karpik A.P. Sovremennoe sostoyanie i problemy geoinformatsionno go obespecheniya territoriy [Current state and problems of geoinformation support of territories]. *Interesko Geo-Sibir*, 2012, no. 2, pp. 3–8.
13. *Snizhenie negativnogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredyu posredstvom likvidatsii obektov nakoplenno go vreda okruzhayushchey srede i snizheniya doli zakhoroneniya tverdykh kommunalnykh otkhodov. Paspport prioritetnogo proekta, utv. prezidiumom Soveta pri Prezidente RF po strategicheskomu razvitiyu i prioritetnym proektam, protokol ot 21.12.2016 № 12* [Reducing the negative impact on the environment through the elimination of objects of accumulated environmental damage and reducing the share of municipal solid waste disposal. Passport of the priority project, approved. Presidium of the Presidential Council for Strategic Development and Priority Projects, dated December 21, 2016 Minutes No. 12]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216317/ (accessed 1 April 2023).
14. *Ekologiya. Paspport natsionalnogo proekta, utv. prezidiumom Soveta pri Prezidente RF po strategicheskomu razvitiyu i natsionalnym proektam, protokol ot 24.12.2018 № 16* [Ecology. Passport of the national project, approved. Presidium of the Council under the President of the Russian Federation for Strategic Development and National Projects, dated December 24, 2018 protocol No. 16]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_316096/ (accessed 1 April 2023).
15. *Poligony dlya tverdykh kommunalnykh otkhodov. Proektirovaniye, ekspluatatsiya i rekvitvatsiya. Svod pravil SP 320.1325800.2017, utv. prikazom Ministerstva stroitelstva i zhilishchno-kommunalnogo khozaystva RF ot 17.11.2017 № 1555/pr* [Landfills for municipal solid waste. Design, operation and reclamation. Code of rules SP 320.1325800.2017, approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, pr dated November 17, 2017 No. 1555]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=STR&n=21871#GzQ9gzS7MDZbjWVU> (accessed 1 April 2023).
16. *Instruktsiya po proektirovaniyu, ekspluatatsii i rekvitvatsii poligonov dlya tverdykh bytovykh otkhodov. Utv. Minstroem Rossii 02.11.1996* [Instructions for the design, operation and reclamation of landfills for municipal solid waste. Approved by the Ministry of Construction of Russia 02.11.1996]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_146721/03a2be231a770dffc965eed2cf766d4b6d4b50e3/ (accessed 1 April 2023).
17. *Ob utverzhdenii Poryadka vedeniya gosudarstvennogo kadastra otkhodov. Prikaz Minprirody Rossii ot 30.09.2011 № 792* [On approval of the procedure for maintaining the state cadastre of waste. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 792 dated September 30, 2011]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121841/ (accessed 1 April 2023).
18. Cubillos M. Multi-site household waste generation forecasting using a deep learning approach. *Waste Management*, 2020, vol. 115, pp. 8–14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.046> (accessed 1 April 2023).
19. Atul K., Samadder S.R., An empirical model for prediction of household solid waste generation rate – a case study of Dhanbad, India. *Waste Management*, 2017, vol. 68, pp. 3–15. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.034> (accessed 1 April 2023).
20. SHaldunova N.P., Denisova N.S., Kirik D.A., *Matematicheskaya obrabotka zemelno-kadastrvoy informatsii* [Mathematical processing of land cadastral information]. Perm, Perm State Agricultural Academy Publ., 2015. 73 p.
21. Yessenamanova M.S., Salykhov R., Tlepbergenova A.E., Yessenamanova Zh.S., Tauova N.R. Forecast of solid waste generation in Atyrau region. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 1889, 032010. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/3/032010.
22. Sudiartha G.A.W., Suyasa I.W.B. Analysis of land requirements of Temesi final disposal facility, Gianyar Regency with 3R waste management scenario. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, no. 623, 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/623/1/012001.
23. Osazee I. Landfill in a sustainable waste disposal. *Terra Nova*, 2021, no. 2 (4), pp. 67–74. DOI: 10.24018/ejgeo.2021.2.4.165.
24. Karpik A.P. Perspektivy razvitiya geodezicheskogo i kartograficheskogo proizvodstva i novaya paradigma geoprostranstvennoy deyatelnosti [Prospects for the development of geodetic and cartographic production and a new paradigm of geospatial activity]. *Vestnik SGUGiT*, 2020, vol. 25, no. 2, pp. 19–29.
25. Zharnikov V.B. Ekologicheskaya kontseptsiya ratsionalnogo zemlepolzovaniya [Ecological concept of sustainable land use]. *Geo-Sibir*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 163–175.
26. Pasechnik E.Yu., Chilinger L.N. Development of the methods of environmental and sanitary-hygienic assessment of urbanized lands (on the example of the Ob-Tom interfluvium). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 350. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012041.
27. Komissarov A.V., Avrunev E.I., Yambaev H.K., Hlebnikova E.P. Svrannenie tochnosti opredeleniya obemov sypuchikh materialov po dannym semki s bespilotnykh letatelnykh apparatov i geodezicheskimi izmereniyami [Comparison of the accuracy of determining the volumes of bulk materials according to survey data from unmanned aerial vehicles and geodetic measurements]. *Vestnik SGUGiT*, 2019, vol. 24, no. 4, pp. 70–77.
28. Kloyzy-Karczmarczyk B., Makoud S. Analysis of municipal waste generation rate in Poland compared to selected European countries. *Web of Conferences*, 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171902025.
29. Sliusar N., Filkin T., Huber-Humer M., Ritzkowski M., Drone technology in municipal solid waste management and landfilling: a comprehensive review. *Waste Management*, 2022, vol. 139, pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.006> (accessed 1 April 2023).
30. Caio César de Sousa Mello, Daniel Henrique Carneiro Salim, Gustavo Ferreira Simões. UAV-based landfill operation monitoring: a year of volume and topographic measurements. *Waste Management*, 2022, vol. 137, pp. 253–263. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.020> (accessed 1 April 2023).
31. Filkin T., Sliusar N., Ritzkowski M., Huber-Humer M. Unmanned Aerial Vehicles for Operational Monitoring of Landfills. *Journal Drones*, 2021, vol. 5, no. 4. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-446X/5/4/125> (accessed 1 April 2023).

Received: 12 April 2022.

Reviewed: 13 May 2023.

Information about the authors

Liliya N. Chilinger, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.
Oleg V. Latin, engineer, Joint Stock Company «Krasnoyarsk Aero geodetic Enterprise».