

Моделирование углеродного баланса полигонов твёрдых коммунальных отходов

© 2022. Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., н. с.,
Н. В. Сырчина¹, к. х. н., доцент, с. н. с.,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

В 2020 г. в Российской Федерации (РФ) масса твёрдых коммунальных отходов (ТКО), направленных на специализированные полигоны, превысила 36 млн т. Более половины этих отходов представлено биоразлагаемыми органическими компонентами. В результате биodeградации отходов образуется свалочный газ (СГ), основными составляющими которого являются CH_4 и CO_2 . Объёмная доля CH_4 в составе СГ достигает 45–75%, CO_2 – 25–55%. Потенциал глобального потепления (ПГП) CH_4 в 25 раз выше, чем ПГП CO_2 , что существенно увеличивает вклад полигонов ТКО в складывающийся углеродный баланс. Активная эмиссия парниковых газов (ПГ) на полигонах ТКО происходит не только в период их эксплуатации, но и на протяжении нескольких десятков лет после закрытия и рекультивации территории. К настоящему моменту предложен ряд математических моделей различной степени сложности, которые с успехом могут быть использованы для оценки воздействия полигонов ТКО на состояние атмосферного воздуха. Расчёты, выполненные согласно модели LandGEM для полигона на 3,55 млн т ТКО показывают, что объём CH_4 , выделенного за всё время существования полигона (100 лет), составит приблизительно 600 млн m^3 , а объём CO_2 – 490 млн m^3 . Общая масса содержащегося в СГ углерода – 560 тыс. т. Лесонасаждения санитарной защитной зоны (СЗЗ), включая рекультивированную территорию тела полигона, за 100 лет могут поглотить 48400 т углерода. Эффективность связывания углерода лесной растительностью при 500-метровой СЗЗ составит 8,6%. С учётом связывания углерода за счёт почвообразовательных процессов на рекультивированной территории сток углерода может достигнуть 9,2% от уровня его эмиссии. По данным аналитического центра при Правительстве РФ, суммарная масса выброса CO_2 от всех источников в РФ (с учётом сектора землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства) в 2019 г. составила 1,5 млрд т CO_2 -экв. Исходя из общей массы складируемых на полигонах отходов, вклад ТКО в общую эмиссию ПГ может достигнуть 1,6% от полной массы выбросов ПГ в CO_2 -эквиваленте.

Ключевые слова: полигоны твёрдых коммунальных отходов, эмиссия парниковых газов, сток парниковых газов, углеродный баланс, охрана окружающей среды.

Modeling carbon balance of municipal solid waste landfills

© 2022. G. Ya. Kantor^{1,2} ORCID: 0000-0002-6462-6702
N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760
T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047
¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

In 2020, in the Russian Federation, the mass of municipal solid waste (MSW) sent to specialized landfills exceeded 36 million tons, of which more than half is represented by biodegradable organic components. As a result of biodegradation of waste, greenhouse gases (GHG) are formed – methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2). The volume fraction of CH_4 in the composition of landfill gas (LFG) reaches 45–75%, CO_2 – 25–55%. The global warming potential (GWP)

of CH_4 is 25 times higher than the GWP of CO_2 , which significantly increases the contribution of MSW landfills to the emerging carbon balance. Active GHG emissions at MSW landfills occur not only during their operation, but also for several decades after their closure and reclamation of the territory.

In this paper, on the basis of the LandGEM calculation model, the contribution of GHG emissions to the total carbon balance is estimated, taking into account the assimilation of carbon by the forest vegetation of the sanitary protection zone and the soil that forms on the surface of the landfill covered with ground after the completion of its active operation. It is shown that the contribution of MSW to the total GHG emissions on the territory of the Russian Federation can be estimated at 1.6% of the total mass of GHG emissions in CO_2 equivalent.

Keywords: municipal solid waste landfills, greenhouse gas emissions, greenhouse gas sinks, carbon balance, environmental protection.

Проблема загрязнения окружающей среды отходами производства и потребления (ОПП) относится к числу острых проблем цивилизационного развития человечества. За последние 15 лет образование ОПП в Российской Федерации (РФ) увеличилось почти в 2,3 раза и, согласно данным официальной статистики, в 2020 г. достигло 6955,7 млн т. Одним из видов ОПП являются твёрдые коммунальные отходы (ТКО), образование которых на территории РФ в 2020 г. составило 48462,0 тыс. т, из них только 1761,9 тыс. т (4% от общей массы) было утилизировано, основная доля – 36097,4 тыс. т была направлена на захоронение [1]. Специфической особенностью ТКО является сложный многокомпонентный состав, включающий легко разлагаемые пищевые отходы (до 28% общей массы), более устойчивые во внешней среде древесину, бумагу, картон, натуральный текстиль, трудно разлагаемые синтетические полимерные материалы и другие непригодные для вторичной переработки компоненты, причём общая доля биоразлагаемой органики в ТКО превышает 50% [2–4]. Попадающие на полигоны органические вещества становятся питательной средой для многочисленных групп организмов-биодеструкторов [5]. Направление процессов деградации зависит от условий, в которые попадают биоразлагаемые отходы. В присутствии кислорода органический углерод окисляется аэробными микроорганизмами до CO_2 , а в анаэробных условиях – метаболизируется метаногенными археями до CH_4 [6, 7]. Комплекс газов, выделяющихся при разложении органических отходов на свалках и полигонах в анаэробных условиях в результате жизнедеятельности метаногенных бактерий, получил название свалочного газа (СГ) [8]. Основными компонентами СГ являются CH_4 и CO_2 , соотношение которых в зависимости от складывающихся условий варьирует в широких пределах. По имеющимся оценкам, доля CH_4 в объёме СГ составляет 45–75%, доля CO_2 – 25–55%. [9]. Как CH_4 ,

так и CO_2 входят в число парниковых газов (ПГ), эмиссия которых подлежит учёту и регулированию [10]. Вклад свалок и полигонов в глобальную эмиссию CH_4 может достигать 9–70 млн т/год [11].

Скорость деструкции поступающих на свалки и полигоны органических веществ определяется их природой и условиями, в которых реализуются микробиологические процессы (температура, влажность, условия аэрации, pH, состав субстрата, возраст свалки и др.) [12, 13]. Продолжительный период деструкции и необходимость учёта множества факторов, влияющих на эмиссию ПГ, существенно затрудняют расчёты складывающегося углеродного баланса.

Согласно СП 320.1325800.2017, срок эксплуатации проектируемых полигонов не должен превышать 25 лет. После заполнения участков хранения и захоронения отходов на предусмотренную высоту полигон закрывают, а нарушенную территорию рекультивируют. Рекультивация предполагает засыпку складированных отходов изолирующим слоем грунта толщиной не менее 0,6 м и озеленение территории. Для озеленения используют травы, кустарники, хвойные и лиственные деревья, характеризующиеся устойчивостью к загрязнению окружающей среды, хорошей способностью к поглощению выделяющихся из тела полигона газов, выраженными фитонцидными свойствами, высокой энергией роста [14].

Активная эмиссия ПГ с поверхности рекультивированных полигонов может продолжаться на протяжении нескольких десятков лет [15], однако зелёные насаждения за счёт процессов фотосинтеза будут обеспечивать определённый сток ПГ. Следует отметить, что и в период эксплуатации полигонов деревья и кустарники, произрастающие на территории их санитарно-защитных зон (СЗЗ), вносят определённый вклад в баланс ПГ, однако количественной оценке соответствующего эффекта до настоящего времени не уделялось должного внимания.

Цель настоящей работы состояла в расчёте углеродного баланса твёрдых коммунальных отходов, размещаемых на полигонах, и оценке площади зелёных насаждений, необходимой для обеспечения углеродной нейтральности соответствующих техногенных объектов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является динамика парниковых газов на типовом полигоне ТКО. Оценку эмиссии ПГ выполняли расчётным методом на основе опубликованных в период с 2000 по 2021 гг. данных о составе ТКО, направлениях и скорости биодegradации органических отходов, составе и объёмах эмиссии ПГ, объёмах стока ПГ, обеспечиваемого зелёными насаждениями в пределах СЗЗ действующих полигонов и зелёными насаждениями рекультивированных территорий закрытых полигонов. При оценке углеродного баланса (УБ) учитывали используемые в настоящее время методики учёта выбросов и поглощения ПГ различными природными и техногенными объектами. Поиск научных публикаций выполняли по ключевым словам в поисковых системах Google Scholar, CiteSeerX, Microsoft Academic, научных электронных библиотеках JSTOR, Taylor & Francis, Project MUSE, КиберЛенинка, eLIBRARY.RU.

Методики расчёта эмиссии продуктов деструкции органических компонентов твёрдых коммунальных отходов

К настоящему моменту предложен целый ряд математических моделей различной степени сложности, которые с успехом могут использоваться для оценки воздействия полигонов ТКО на состояние атмосферного воздуха с учётом их специфики и размеров [16]. Одна из первых практически применимых методик [17] была разработана группой российских научно-исследовательских учреждений и научно-производственных предприятий (НПП «Экопром», Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова, НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина, НИИ охраны атмосферного воздуха, НПП «Логус»). Она предназначена для расчёта выбросов газообразных загрязняющих веществ (ГЗВ) в атмосферный воздух с полигонов твёрдых бытовых (коммунальных) и промышленных отходов для нормального режима их эксплуатации. В основу методики положены эмпирические закономерности,

выявленные при эксплуатации реальных объектов захоронения ТКО.

В соответствии с этой методикой удельный выход СГ за период его активной стабилизированной генерации при метановом брожении определяется по уравнению:

$$Q_w = 10^{-6} R (100 - W) (0,92Ж + 0,62У + 0,34Б),$$

где Q_w – удельный выход СГ за период его активной генерации с учётом влажности отходов, кг/кг отходов; R – содержание органической составляющей в отходах, %; $Ж$ – содержание жироподобных веществ в органике отходов, %; $У$ – содержание углеводов в органической составляющей отходов, %; $Б$ – содержание белковых веществ в органической составляющей отходов, %; W – фактическая влажность отходов в %.

Количественный выход СГ за год, отнесённый к одной тонне отходов, определяется по формуле:

$$P_{уд.} = \frac{Q_w}{t_{сбр.}} \cdot 10^3 \text{ кг/т отходов в год,}$$

где $t_{сбр.}$ – период полного сбраживания органической части отходов в годах, определяемый по приближённой эмпирической формуле:

$$t_{сбр.} = \frac{10248}{T_{менл.} \cdot (t_{ср.менл.})^{0,301966}},$$

где $t_{ср.менл.}$ – средняя из среднемесячных температура воздуха в районе полигона ТКО и промышленных отходов (ПО) за тёплый период года, в °C; $T_{менл.}$ – продолжительность тёплого периода года в районе полигона ТКО и ПО, в днях; 10248 и 0,301966 – удельные коэффициенты, учитывающие биотермическое разложение органических компонентов.

Отличительной особенностью этой методики является детальный учёт химического состава наиболее быстро разлагающихся пищевых отходов, что на практике существенно усложняет её применение.

В настоящее время в мире для расчёта эмиссии ГЗВ на полигонах захоронения ТКО наиболее широко используются математические модели, базирующиеся на кинетическом уравнении первого порядка, основанном на предположении, что скорость химической реакции пропорциональна концентрации реагирующего вещества:

$$\frac{dC(t)}{dt} = -k \cdot C(t) \tag{1}$$

где $C(t)$ – концентрация вещества, t – время, k – кинетический коэффициент ($k > 0$). Знак «минус» в правой части уравнения указывает, что концентрация разлагаемого вещества убывает со временем.

Решение уравнения (1) имеет вид:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-kt} = \frac{C_0}{2^{t/\tau}},$$

где C_0 – начальная концентрация (концентрация в момент времени $t = 0$), τ – период полураспада вещества. Величины кинетического коэффициента и периода полураспада связаны соотношением $\tau = \frac{\ln 2}{k}$.

В реальном случае разложения многокомпонентных смесей веществ масса или объём выделяющегося СГ выражается суммой слагаемых, каждое из которых рассчитывается исходя из своих значений начальной массы и кинетического коэффициента.

Рассмотрим наиболее известные модели такого рода.

1. Модель LandGEM (2005). Модель эмиссии СГ (**Landfill Gas Emissions Model**), разработанная Агентством охраны окружающей среды США (US EPA) [18] – одна из первых расчётных моделей генерации CH_4 на полигонах захоронения твёрдых отходов, учитывающая поступление новых порций отходов и экспоненциальный спад их количества по мере биологической деструкции.

Расчётное уравнение имеет вид:

$$Q_{\text{CH}_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_j} \quad (2)$$

где Q_{CH_4} – годовая генерация CH_4 в расчётном году ($\text{м}^3/\text{год}$); i – порядковый номер года (шаг – 1 год); n – (расчётный год) – (начальный год накопления отходов); j – шаг по времени 0,1 года; k – скорость генерации метана (1/год); L_0 – потенциальная ёмкость генерации CH_4 ($\text{м}^3/\text{т}$); M_i – масса отходов, принятых в i -м году (т); t_{ij} – возраст j -й части массы отхода, принятого в i -м году (в десятых долях года, например, 3,2 года).

2. Модель IPCC (2006). Эта модель генерации CH_4 на полигонах захоронения твёрдых отходов разработана Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC) и положена в основу методического документа IPCC «Emissions from solid waste disposal sites» (Выбросы от полигонов захоронения твёрдых отходов) [19]. В соответствии с этим документом масса CH_4 , выделяемого в течение y -го года эксплуатации по-

лигона, вычисляется по формуле (в пересчёте на эквивалентное количество CO_2 в соответствии с потенциалом глобального потепления CH_4 , т/год):

$$BE_{\text{CH}_4, \text{SWDS}, y} = \varphi_y \cdot (1 - f_y) \cdot GWP_{\text{CH}_4} \cdot (1 - OX) \cdot \frac{16}{12} \cdot F \cdot DOC_{f,y} \cdot MCF_y \cdot \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-k_j \cdot (y-x)} \cdot (1 - e^{-k_j}) \quad (3)$$

где $BE_{\text{CH}_4, \text{SWDS}, y}$ – базовая эмиссия CH_4 за y -й год эксплуатации полигона; x – порядковый номер года эксплуатации полигона (от 1 до y); $DOC_{f,y}$ – массовая доля углерода в деградирующем органическом веществе, разлагаемом в специфических условиях y -го года; $W_{j,x}$ – количество твёрдого отхода типа j , размещённого на полигоне в x -м году; φ_y – корректирующий фактор модели для учёта неопределённости модели в y -м году; f_y – доля метана, собранного на полигоне и сожжённого или использованного другим образом, предотвращающим эмиссию CH_4 в атмосферу в y -м году; GWP_{CH_4} – потенциал глобального потепления CH_4 ; OX – фактор окисления, отражающий количество CH_4 с полигона, который окисляется в слое почвы или другого материала, покрывающего отходы; F – объёмная доля CH_4 в составе СГ; MCF_y – корректирующий коэффициент для CH_4 в y -м году; DOC_j – массовая доля углерода разлагаемого органического вещества в отходе типа j ; k_j – скорость разложения (кинетический коэффициент) для отхода типа j ; j – тип отхода на полигоне ТКО; 16 – молярная масса метана; 12 – молярная масса углерода.

В отличие от LandGEM, модель IPCC учитывает различную скорость разложения отходов разных типов, но требует знания большого количества разнообразных параметров, что чрезвычайно усложняет её практическое применение. Поэтому наибольшее распространение в настоящее время получили модель LandGEM и её модификации.

3. Украинская (2009) и Восточноевропейская (2013) модели. Эти модели являются модификациями LandGEM с элементами модели IPCC. Национальная модель газобразования [20], разработанная в НТЦ «Биомасса» Института технической теплофизики НАН Украины, описывается уравнением:

$$Q(t) = \sum_{x=1}^t \sum_{j=0,1}^1 2 \cdot k \cdot L_0(x) \cdot \left(\frac{R(x)}{10} \right) \cdot e^{-kt_{x,j}} \cdot (MCF) \cdot (F) \quad (4)$$

где $Q(t)$ – величина образования биогаза, $\text{м}^3/\text{год}$; k – параметр скорости образования биогаза, $1/\text{год}$; $L_0(x)$ – удельное газообразование, $\text{м}^3/\text{т ТБО}$; $R(x)$ – количество ТБО, вывезенных на полигон на протяжении года x , $\text{т}/\text{год}$; MCF – фактор коррекции метана; F – коэффициент коррекции на сжигание; t – время от начала эксплуатации полигона ТБО, год ; x – параметр суммирования, год ; j – параметр суммирования, $0,1$ года.

Восточноевропейская модель [21] полностью аналогична украинской, но некоторое отличие состоит в классификации типов отходов и принятых значениях соответствующих кинетических коэффициентов образования метана.

Расчёт углеродного баланса типичного полигона захоронения твёрдых коммунальных отходов крупного города

В качестве конкретного примера рассмотрим вариант расчёта УБ полигона ТКО, спроектированного и эксплуатируемого в соответствии с нормативным документом [22] для города с населением 500 тыс. человек. При высоте складирования отходов 25 м площадь полигона составит 31 га, а тело полигона будет иметь форму усечённой пирамиды с уклоном внешних откосов 1 : 4. В этом случае площадь верхней горизонтальной грани пирамиды составляет 12,7 га, а её объём – 5,3 млн м^3 .

После уплотнения тяжёлыми бульдозерами ТКО будут иметь плотность $0,67 \text{ т}/\text{м}^3$. Таким образом, масса ТКО на полностью заполненном полигоне составит 3,55 млн т.

Срок активной эксплуатации полигона можно оценить, исходя из норматива образования отходов, составляющих $2,5 \text{ м}^3/\text{год}$ на человека. При исходной плотности отходов $0,12 \text{ т}/\text{м}^3$ масса ежегодного поступления ТКО на полигон от населения 500 тыс. человек составит 150 тыс. т, а время полного заполнения полигона – $3550000/150000 = 23,7$ (около 24 лет).

Для расчёта величины выброса углерода в атмосферу за всё время существования полигона воспользуемся уравнением модели LandGEM со следующими исходными данными: потенциальная ёмкость генерации CH_4 $L_0 = 170 \text{ м}^3/\text{т}$; скорость генерации CH_4 (кинетический коэффициент) $k = 0,05 \text{ год}^{-1}$; ежегодное поступление ТКО на полигон $M_i = 150000 \text{ т}$ (для всех i).

Результаты расчёта по уравнению (2) с вышеуказанными параметрами полигона ТКО приведены на рисунке (в предположении, что полигон эксплуатируется с начала 2000 г.).

Вторым по объёму эмиссии в составе СГ является CO_2 . Соотношение объёмов $\text{CH}_4 : \text{CO}_2$ оценивается в пределах от 60:40 до 50:50 [18]. Для дальнейшего расчёта примем среднюю величину отношения $\text{CH}_4 : \text{CO}_2 = 55:45$. Тогда максимальный годовой объём эмиссии CO_2 с данного типового полигона составит 14,7 млн м^3 .

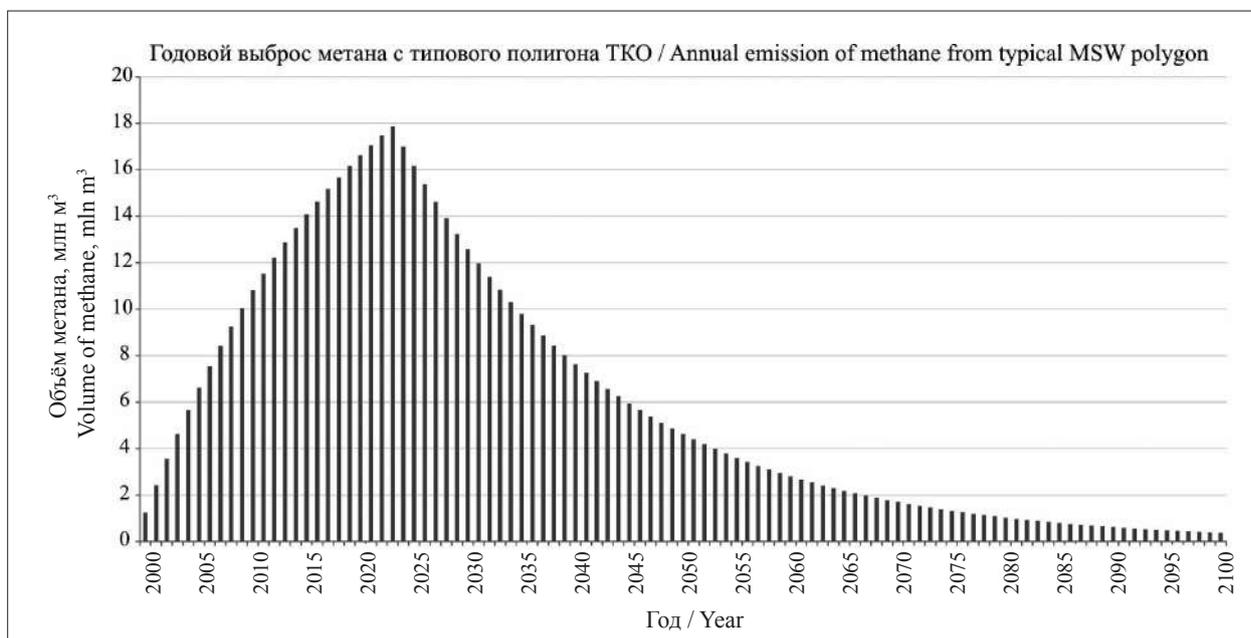


Рис. Динамика эмиссии CH_4 типовым полигоном твёрдых отходов в расчёте на 500 тыс. чел. населения в течение 100 лет (по модели LangGEM)
Fig. Dynamics of methane emissions from a typical solid waste landfill per 500 thousand people over 100 years (according to the LangGEM model)

Учитывая плотность CH_4 0,657 кг/м³, а CO_2 1,977 кг/м³, получим величину максимального выброса углерода в атмосферу приблизительно 16,8 тыс. т/год.

Наиболее распространённым способом противодействия росту концентрации CO_2 в атмосфере (и следующим за ним нежелательным изменением климата) является озеленение территорий, на которых расположены источники углекислого газа. Для полигона ТКО оптимальным мероприятием по декарбонизации может служить облесение территории как самого полигона (после прекращения активной эксплуатации), так и его СЗЗ, нормативная ширина которой в соответствии с [22] составляет 500 м. Площадь полигона вместе с СЗЗ составляет 242 га. Поглотительная способность по углероду у различных пород деревьев (берёза, ель, сосна, лиственница) в средневозрастных древостоях примерно одинакова и в климатических условиях широт 55–60° с.ш. близка к 2 т/га в год [14, 23]. Таким образом, максимальная масса ассимилированного углерода в пределах СЗЗ полигона ТКО насчитывает 484 т в год, что составляет всего 2,9% от массы углерода в газообразных выбросах полигона. Для полного поглощения максимального годового выброса углерода требуется площадь лесонасаждений 8,4 тыс. га, т.е. сплошной лес среднего возраста в радиусе 5,2 км от полигона.

Если оценивать эффективность декарбонизирующей функции СЗЗ за столетний период, то результат будет следующий. При полной массе ТКО на полигоне 3,55 млн т объём CH_4 , выделенного за всё время существования полигона, составит приблизительно 600 млн м³, а объём CO_2 – 490 млн м³. Общая масса углерода в выбросах составит 560 тыс. т. Лесонасаждения в пределах СЗЗ и рекультивированной территории полигона за 100 лет могут поглотить $2 \cdot 242 \cdot 100 = 48400$ т углерода. Таким образом, эффективность связывания углерода лесной растительностью при 500-метровой СЗЗ составит 8,6%.

Некоторое количество углерода в газообразных выбросах полигона ТКО может быть связано в процессе почвообразования в грунте, которым будет закрыт полигон после завершения его активной эксплуатации. Для приблизительной оценки эффективности этого канала стока углерода примем следующие исходные данные: плотность грунта – 1,5 т/м³; мощность гумусового горизонта – 30 см; содержание накопленного гумуса в почве – 5%; содержание углерода в гумусе – 50%. Тогда

накопление углерода на территории полигона площадью 31 га составит 3500 т, или 7% от массы углерода, ассимилированного растительностью в пределах СЗЗ полигона, а общая оценка эффективности связывания углерода на этой территории возрастет до 9,2%.

Для оценки климатического эффекта эмиссии ПГ полигонами ТКО необходимо учитывать различие потенциалов глобального потепления (ПГП) CO_2 и CH_4 . Принимая 100-летний ПГП CH_4 равным 25, получим величину полной массы выброса за 100 лет 10,9 млн т CO_2 -экв, а с учётом поглощения ПГ растительностью и почвой на территории полигона и СЗЗ – 9,9 млн т CO_2 -экв, или в среднем за год 99 тыс. т CO_2 -экв.

Общая масса ТКО, поступивших на полигоны в РФ в 2020 г., составила 36,1 млн т., что превосходит годовое поступление ТКО на типовой полигон в 241 раз. Следовательно, полная масса годового выброса CO_2 с полигонов ТКО с учётом эквивалентного количества CH_4 составит 23,9 млн т CO_2 -экв.

По данным аналитического центра при Правительстве РФ, [24], суммарная масса выбросов CO_2 от всех источников в России с учётом сектора землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства в 2019 г., составила 1,5 млрд т CO_2 -экв. Таким образом, эмиссия ПГ полигонами ТКО составляет 1,6% от полной массы выбросов в CO_2 -эквиваленте.

Заключение

Расчёт углеродного баланса полигонов ТКО представляет весьма сложную задачу, приблизительное решение которой в настоящее время возможно только с использованием большого количества допущений и предположений, не имеющих строгого научного и методического обоснования.

Для получения более точных данных об объёмах эмиссии и стока ПГ в пределах экосистем полигонов ТКО необходимо проведение глубоких научных исследований, направленных на детализацию динамики генерации ПГ в теле полигона в зависимости от сезона, особенностей климата, принятой технологии складирования отходов и т.д. Особое значение представляет информация о скорости деградации трудно разлагаемых отходов из синтетических органических материалов (пластмассы, резина, синтетические волокна и т.п.).

Полученные данные свидетельствуют о том, что вклад полигонов ТКО в общий объём

эмиссии ПГ от всех источников относительно невелики (ориентировочно 1,6%), причём его объём может быть уменьшен за счёт снижения доли CH_4 в СГ. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы может быть акклиматизация метанотрофных организмов и их интродукция в видовой состав фитоценозов на поверхности закрытых полигонов ТКО.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги» рег. № 1021051202042-2-1.6.19.

References

1. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020. State report. Moskva: Ministry of Natural Resources of Russia; Moscow Lomonosov State University, 2021. 864 p. (in Russian).
2. Kireichikov I.V., Unzhakov V.V., Maslov D.I. What lies in the container, or what is the danger of non-hazardous MSW // Tverdyye bytovyye otkhody. 2021. No. 2 (176). P. 32–37 (in Russian).
3. Kireichikov I.V., Unzhakov V.V., Maslov D.I. Organics in MSW: what are we dealing with? // Tverdyye bytovyye otkhody. 2021. No. 4 (178). P. 34–37 (in Russian).
4. Solomin I.A., Afanas'eva V.I. Composition and properties of solid municipal waste, taken into account when choosing technical methods of waste management // Prirodoobustroystvo. 2017. No. 3. P. 82–90 (in Russian).
5. Angelidaki I., Mogensen A., Ahring B. Degradation of organic contaminants found in organic waste // Biodegradation. 2000. V. 11. P. 377–383. doi: 10.1023/A:1011643014990
6. Mindubaev A.Z., Belostotsky D.E., Minzanova S.T., Mironov V.F., Alimova F.K., Mironova L.G., Kononov A.I. Methanogenesis: biochemistry, technology, application // Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Estestvennyye nauki. 2010. No. 2. P. 178–191 (in Russian).
7. Huang L.N., Chen Y.Q., Zhou H., Luo S., Lan C.Y., Qu L.H., Characterization of methanogenic Archaea in the leachate of a closed municipal solid waste landfill // FEMS Microbiology Ecology. 2003. V. 46. No. 2. P. 171–177. doi: 10.1016/S0168-6496(03)00218-6
8. Balakhchina T.K. Assessing the impact of landfill gas from solid waste landfills on humans // Nauchnyy dialog. 2012. No. 2. P. 41–57 (in Russian).
9. Sadchikov A.V. Degassing of municipal solid waste landfills // Fundamentalnyye issledovaniya. 2017. No. 2. P. 82–86 (in Russian).
10. Iwata H., Okada K. Greenhouse gas emissions and the role of the Kyoto Protocol // Environ Econ Policy Stud. 2014. V. 16. P. 325–342. doi: 10.1007/s10018-012-0047-1
11. Spokas K., Bogner J., Chanton J., Morcet M., Aran C., Graff C., Moreau-Le-Golvan Y., Hebe I. Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? // Waste Management. 2006. V. 26. P. 516–525. doi: 10.1016/j.wasman.2005.07.021
12. Park J.W., Shin H.C. Surface emission of landfill gas from solid waste landfill // Atmospheric Environment. 2001. V. 35. No. 20 P. 3445–3451. doi: 10.1016/S1352-2310(01)00118-2
13. Haarstrick A., Hempel D., Ostermann L., Ahrens H., Dinkler D. Modelling of the biodegradation of organic matter in municipal landfills // Waste Management. 2001. V. 19. P. 320–331. doi: 10.1177/0734242X0101900409
14. Lutsevich A.A. Selection of forest belt flora for recultivation of dumps of solid domestic waste // Forestry Engineering Journal. 2014. No. 4 (16). P. 21–26 (in Russian). doi: 10.12737/8435
15. Rada E.C., Ragazzi M., Stefani P., Schiavon M., Torretta V. Modelling the potential biogas productivity range from a MSW landfill for its sustainable exploitation // Sustainability. 2015. V. 7. P. 482–495. doi: 10.3390/su7010482
16. Volynkina E.P., Domnin K.I. Mathematical model for predictive calculations of formation and extraction of landfill gas at closed solid waste dumps // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta. 2014. No. 3 (9). P. 62–70 (in Russian).
17. Methodology for calculating the quantitative characteristics of emissions of pollutants into the atmosphere from solid domestic and industrial waste landfills. Moskva: NPP “Ekoprom”, 2004. 20 p. (in Russian).
18. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide [Internet resource] <https://www3.epa.gov/ttnca1/dir1/landgem-v302-guide.pdf> (Accessed: 18.01.2022).
19. Emissions from solid waste disposal sites [Internet resource] <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-04-v6.0.0.pdf> (Accessed: 18.01.2022).
20. Ukraine Landfill Gas Model: User's Manual. Version 1.0. 2009 [Internet resource] https://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_manual.pdf (Accessed: 18.01.2022).
21. Central and Eastern Europe Landfill Gas Model V. 1. [Internet resource] https://globalmethane.org/documents/ECE%20Model%20User%20Manual_FINAL.pdf (Accessed: 18.01.2022).
22. Instructions for the design, operation and reclamation of municipal solid waste landfills (approved by the Ministry of Construction of the Russian Federation on 02.11.96) [Internet resource] <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=367199> (Accessed: 18.01.2022).
23. Karaseva M.A. Productivity and carbon sequestration functions of larch phytocenoses in the Middle Volga region // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. 2002. No. 4. P. 22–27 (in Russian).
24. Grigorev L., Pavlyushina V., Muzychenko E., Kheyfets E., Kheyfets E. Bulletin on current trends in the Russian economy. V. 66, October. Ecology and economics: the trend towards decarbonization. Analiticheskiy tsentr pri Pravitelstve Rossiyskoy Federatsii, 2020. 18 p. (in Russian).