

УДК 504.05

ОЦЕНКА ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ИЗ МЕСТ ЗАХОРОНЕНИЯ ТБО: КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК И АДАПТАЦИЯ К УСЛОВИЯМ ОДЕССКОЙ ОБЛАСТИ**Т. А. Сафранов**, проф., д-р геол.-минер. наук, проф., ОДЕКУ**В. Ю. Приходько**, доц., канд. геогр. наук**Т. П. Шанина**, доц., канд. хим. наук*Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, vks26@ua.fm*

В статье представлен обзор наиболее используемых методик расчета эмиссии биогаза и/или его компонентов из мест захоронения твердых бытовых отходов (Национальная многокомпонентная модель, IPCC и LandGEM модели) в оригинальном и адаптированном к украинским условиям вариантах. На основе критического анализа моделей описаны их преимущества, недостатки и показаны возможности синтеза. Представлена адаптация моделей применительно к условиям Одесской области и показаны результаты расчетов эмиссии парниковых газов при захоронении годового объема твердых бытовых отходов на полигонах и свалках.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, парниковые газы, метан, эмиссия, модель.

1. ВВЕДЕНИЕ

Основным методом обращения с твердыми бытовыми отходами (ТБО) в Украине является их захоронение на свалках и полигонах. По данным Национального доклада о состоянии окружающей природной среды в Украине в 2014 г. было собрано 45 млн. м³ или 10 млн. т ТБО и вывезено в места захоронения, которых официально насчитывается 6 тыс. общей площадью более 9 тыс. га. Количество стихийных свалок составило 24 тыс. общей площадью 1,5 тыс. га. Известно, что воздействие таких мест захоронения ТБО на атмосферный воздух заключается в выделении биогаза как продукта анаэробной деструкции органической части отходов при участии микроорганизмов. Основными составляющими биогаза являются метан и углекислый газ – парниковые газы (ПГ), антропогенная эмиссия которых обуславливает климатические изменения планетарного масштаба. По данным Агентства защиты окружающей среды США (U.S. EPA) [1], свалки и полигоны ТБО являются третьим по величине антропогенным источником метана: 11 % от общего количества, поступающего из антропогенных источников в 2010 г. В 2013 г. на долю сектора «Отходы» в Украине приходилось 15,3 % от общего количества метана (для сравнения, в 1990 г. данный показатель составил 5,5 %), из них 64 % приходится на места захоронения ТБО. Сектор «Отходы» – единственный, для которого характерна положительная динамика эмиссии метана. Выбросы метана из мест захоронения ТБО за период 1990-

2013 гг. выросли на 23,66 % [2]. Экологические проблемы, связанные с полигонами и свалками ТБО, будут усугубляться по причине отсутствия эффективной системы обращения с отходами. В долгосрочной перспективе количество ТБО будет ежегодно увеличиваться, а основным методом обращения с ними будет оставаться захоронение. Поэтому особую актуальность приобретают исследования по оценке воздействия мест захоронения ТБО на окружающую природную среду (ОПС), в частности, оценка эмиссии ПГ (или, с другой стороны, оценка энергетического потенциала мест захоронения ТБО). Целью данного исследования является адаптация наиболее используемых методик оценки эмиссии ПГ из мест захоронения ТБО для условий Одесской области. Для этого необходимо провести сравнительный анализ существующих методик оценки эмиссии ПГ из мест захоронения ТБО и провести их апробацию. Объект исследования – оценка эмиссии ПГ с мест захоронения ТБО, предмет исследования – сравнительный анализ и адаптация методик оценки эмиссии ПГ с мест захоронения ТБО применительно к условиям Одесской области.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Одним из основных нормативных документов по оценке эмиссии метана из мест удаления отходов является «Национальный Кадастр антропогенных выбросов...» (2015) [2]. Основу раздела по оценке эмиссии метана из мест захоронения ТБО составляют, в частности, работы С. Л. Шмарина (с соавторами) [3, 4]. Достаточно

детально вопросы адаптации методик оценки эмиссии биогаза со свалок и полигонов ТБО к украинским условиям изложены в работах Ю. Б. Матвеева и А. Ю. Пухнюка [5, 6], а также в исследованиях Агентства по защите окружающей среды США [1, 7].

Следует отметить, что рассмотренные ниже методики оценки эмиссии биогаза из мест захоронения ТБО называются «моделями», хотя в основу их положена одна модель – анаэробной деструкции органического вещества с образованием соответствующих продуктов разложения. Но для удобства в работе используются авторские названия методик, т.е. модели.

3. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время наиболее используемыми в мире моделями для оценки эмиссии биогаза и/или его компонентов являются следующие:

1) модель, предложенная Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК, IPCC) [8];

2) модель эмиссии биогаза (Landfill Emission Gas Model – LandGEM) [9], разработанная Агентством по защите окружающей среды США и адаптированная к украинским условиям (Ukraine LFG Model) [7] в рамках программы U.S. EPA's Landfill Methane Outreach Program (одна из так называемых LMOP's Models).

Некоторые сравнения методик проведены в работе [10].

3.1 Национальная модель

Оценка эмиссии метана из мест захоронения ТБО проводится по Национальной многокомпонентной модели на основе метода затухания первого порядка третьего уровня детализации (далее – Национальная модель), которая разработана в Институте технической теплофизики НАН Украины. Данная модель используется в расчетах выбросов метана при составлении Национального кадастра [2]. Модель основана на зависимости образования метана от характеристик отходов и условий захоронения, которые определяют промежуточный расчетный показатель – количество органического углерода, способного биологически разлагаться и, соответственно, переходить в метан. Основой для разработки Национальной модели является методика оценки эмиссии метана, предложенная Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) [8] и разработки [7].

Эмиссия метана из мест захоронения отходов

($Q(t)^{em}$) рассчитывается следующим образом:

$$Q(t)^{em} = [Q(t) - R] \cdot (1 - OX), \quad (1)$$

где $Q(t)$ – количество метана, которое образуется за время t , т; R – масса собранного (рекуперированного) метана, т; OX – фактор окисления метана (по причине отсутствия данных $OX = 0$).

Таким образом, при условии отсутствия системы сбора и утилизации биогаза на полигонах ТБО эмиссия метана полностью определяется величиной образования в теле полигона ($Q(t)$).

Образование метана при захоронении ТБО, вывезенных за текущий и предыдущие годы, рассчитывается как

$$Q(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A \cdot k_j \cdot MWS_i \cdot MWS_{i,j} \cdot L_{0i,j} \cdot e^{-k_j \cdot (t-x)}, \quad (2)$$

где A – нормализующий множитель, который определяется по формуле (3)

$$A = (1 - e^{-k_j}) / k_j, \quad (3)$$

где k_j – постоянная темпов образования метана для j -го компонента ТБО, год⁻¹ (табл. 1); MWS_i – общая масса ТБО, захороненных в год i , т/год; $MWS_{j,i}$ – содержание j -го компонента в ТБО в i -м году, %; t – расчётный год (если необходимо провести расчёты за один год, то $t=1$), год; x – период, за который вносятся данные, год; $L_{0j,i}$ – потенциал образования метана в год i , тСН₄/тТБО:

$$L_{0i,j} = DOC_j \cdot DOC_F \cdot F \cdot 16/12 \cdot MCF_i, \quad (4)$$

где DOC_j – общее количество органического углерода, способного биологически разлагаться, в j -ой фракции, тС/тТБО; DOC_F – часть углерода, которая принимает участие в реакциях распада ($DOC_F = 0,5$); F – содержание метана в биогазе ($F = 0,5$); $16/12$ – коэффициент пересчёта углерода в метан; MCF_i – фактор коррекции образования метана, зависящий от условий захоронения ТБО (табл. 2).

Как видно из приведенных уравнений, количество метана, который образуется в местах захоронения ТБО, зависит от ряда факторов, характеризующихся определенной спецификой на национальном и региональном уровнях: морфологический состав и содержание биоразлагаемо-

го углерода в отдельных компонентах ТБО, а также условия захоронения ТБО (природные и технические).

Основным источником углерода для образования метана являются компоненты ТБО, которые содержат биодоступный углерод: бумага и картон, пищевые и садово-парковые отходы, древесина, текстиль, а также кожа, резина и средства личной гигиены, выделенные в качестве отдельных компонентов сравнительно недавно. Их предлагается учитывать в Руководящих принципах (2006) [8], тогда как в Руководящих принципах (2000) выделялись только четыре компонента, а бумага и текстиль объединялись в одну категорию (хотя, как видно из табл. 3, значения DOC_j для данных категорий различны).

Показатель k_j – это одна из констант модели, которая определяет скорость разложения отходов и продуцирования биогаза. k_j определяется покомпонентно и зависит от таких факторов, как влажность, рН отходов, содержание биогенных элементов и температура [7, 8], т.е. частично от климатических особенностей территории, где расположено место захоронения ТБО (табл. 1).

Таблица 1 – Значения показателей k_j на разных уровнях детализации

№	Компонент	$k_j, \text{год}^{-1}$		
		по умолчанию [8]	национальный уровень [2]	региональный уровень [7]
I	Бумага и картон	0,06	0,048	0,024
II	Текстиль	0,06	0,048	0,024
III	Пищевые отходы	0,185	0,110	0,120
IV	Древесина	0,03	0,024	0,012
V	Садово-парковые отходы	0,1	0,07	0,06
VI	Средства личной гигиены	0,1	0,048	0,120
VII	Кожа, резина	–	0,048	0,012

В работе [3] показано, что использование национальных коэффициентов k_j позволяет уменьшить оценочную величину эмиссии метана на 10-18 % и получить несколько иное распределение данного параметра во времени. Более медленное разложение обеспечивает более низкую

эмиссию метана в ближайшие годы, которая в дальнейшем будет несколько выше.

Определение потенциала образования метана $L_{0,j,i}$ (формула (4)) проводится покомпонентно и, в конечном итоге, зависит от условий захоронения отходов (показатель MCF_i , табл. 2) и содержания биоразлагаемого углерода (DOC_j , табл. 3).

Таблица 2 – Значения показателя MCF_i [8]

Типы полигонов и свалок	MCF_i
Управляемые анаэробные	1,0
Управляемые полуанаэробные	0,5
Неуправляемые глубокие	0,8
Неуправляемые неглубокие	0,4
Неклассифицированные	0,6
Среднее значение для Украины, начиная с 2008 [2]	0,726

Значением $MCF_i = 0,6$ для неклассифицированных полигонов и свалок рекомендуется пользоваться по умолчанию в случае отсутствия информации о распределении мест захоронения по первым четырем категориям. Как видно из табл. 2, уточнение данного параметра для Украины повышает точность расчётов.

Морфологический состав ТБО является определяющим фактором при образовании метана в местах захоронения отходов. От него зависит масса биоразлагаемого углерода, который трансформируется (с разной скоростью) в метан и другие ПГ.

Как видно из табл. 3, использование детализированных данных о морфологическом составе ТБО также повышает точность расчетов.

Для получения величины образования метана $Q(t)$ в CO_2 -экв., необходимо в формулу (2) ввести дополнительный множитель – потенциал глобального потепления для метана, равный 21.

3.2 Модель IPCC

Уравнение для оценки эмиссии метана согласно модели IPCC также имеет вид уравнения (1). Количество образующегося метана $Q(t)$ рассчитывается по формуле (5)

$$Q(t) = DDOC_m \cdot F \cdot 16/12, \quad (5)$$

где $DDOC_m$ – общая масса биологически разложившегося углерода, которая находится по серии уравнений [8].

Таблица 3 – Содержание биоразлагаемых компонентов в общей массе ТБО

№	Компонент	DOC_j , тС/тТБО	Содержание компонентов ($MWS_{j,i}$), %		
			Восточная Европа [8]	национальный уровень [4]	региональный уровень [4]
I	Бумага и картон	0,40	21,8	14,6	15,0
II	Текстиль	0,24	4,7	4,0	3,0
III	Пищевые отходы	0,15	30,1	33,1	27,5
IV	Древесина	0,43	7,5	1,7	2,5
V	Садово-парковые отходы	0,2	–	3,8	3,0
VI	Средства личной гигиены	0,24	–	1,1	–
VII	Кожа, резина	0,39	1,4	1,7	1,9

3.3 Модель LandGEM

Модель для расчета эмиссии метана LandGEM, разработанная Агентством по защите окружающей среды США, также основывается на уравнении разложения (затухания) первого порядка. Так, эмиссия метана от мест захоронения ТБО (Q_{CH_4}) описывается уравнением [9]

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}, \quad (6)$$

где n – период времени, за который рассчитывается эмиссия метана; k – коэффициент генерации метана, год⁻¹; L_0 – потенциал образования метана в год i , тСН₄/тТБО; M_i – масса ТБО, захороненных в год i , т/год; t_{ij} – возраст j -ой части массы отходов M_i , захороненной в год i .

Уравнение (6) для расчета эмиссии биогаза (Q_{LFG}), адаптированное для Украины (Ukraine LFG Model), выглядит следующим образом [7]:

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \cdot MCF \cdot F, \quad (7)$$

где MCF – поправочный коэффициент метанообразования;

F – поправочный коэффициент для возгорания.

В отличие от прототипа, в украинской модели также проработаны значения параметра k , который зависит от климатических особенностей территории и категории отходов (выделено 4 категории по скорости разложения).

Территория Украины делится на 4 климатических региона в зависимости от среднесуточ-

ной температуры и суммы осадков за год [3, 7]. Однако следует отметить, что недостатком предложенного районирования территории Украины на основе климатических характеристик является их привязка к административно-территориальным районам. Например, Одесская область характеризуется значимыми климатическими различиями северной и южной части, однако для всей территории присваивается единый набор значений параметра k .

Нами рассчитаны средние значения параметра k для 4-х категорий отходов с учетом площади регионов, которым присваиваются определенные значения k (табл. 4).

В адаптированном варианте модели LandGEM параметр L_0 также пересмотрен в зависимости от категории отходов на основании полевых исследований морфологического состава ТБО отдельных городов Украины. На основе данных о морфологическом составе ТБО областей Украины [4], методом средневзвешенного нами определены средние значения параметра k и L_0 (табл. 4).

В исходной модели (6) параметры k и L_0 зависят от типа полигона. Как видим из табл. 4, определение параметров k и L_0 для регионов Украины значительно повышает точность расчетов. Если сопоставить средние значения параметров и предлагаемые по умолчанию, то видно, что ТБО Украины характеризуются несколько меньшим потенциалом эмиссии метана, а скорость разложения органической составляющей несколько выше.

Таблица 4 – Значения параметров k и L_0 (приняты или рассчитаны по данным [4, 7])

Категория отходов	k , год ⁻¹	L_0 , м ³ /т
1 (очень быстро разлагающиеся)	0,135	69
2 (быстро разлагающиеся)	0,068	126
3 (среднезагнивающие)	0,027	214
4 (медленно разлагающиеся)	0,0135	201
Среднее для Украины	0,0948	112,3
Среднее для Одесской области	0,0749	132,6
Значения в модели LandGEM по умолчанию [9]	0,05	170

Как и в Национальной модели, значения параметра MCF также определяются типом свалки и, в основном, соответствуют табл. 2.

Коэффициент F зависит от площади и полноты выгорания отходов на свалке, пропорционально чему уменьшается эмиссия биогаза. В работе [5] для обеспечения консервативной оценки биогазового потенциала свалок Украины предлагается значение $F = 0,8$.

Для моделей IPCC и LandGEM разработаны автоматизированные инструменты на основе электронных таблиц MS Excel, позволяющие осуществлять расчёты и создавать графический материал. Инструмент LandGEM Version 3.02 позволяет проводить расчет эмиссии не только метана, но и диоксида углерода, а также неметановых летучих органических соединений (НЛОС) (в т.ч. по конкретным веществам). Величина эмиссии диоксида углерода и НЛОС зависит от результатов расчёта эмиссии метана по уравнению (5). В IPCC Waste Model и LandGEM Version 3.02 есть функции, позволяющие работать с промышленными отходами как источником ПГ.

4. ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим практические аспекты применения Национальной модели, а также моделей IPCC и LandGEM для Одесской области. Как показано в работе [11], Одесская область характеризуется наибольшим образованием ТБО среди южных областей Украины. Практически весь объем ТБО вывозится на свалки и полигоны, которые занимают 0,03 % площади области. Наибольшая свалка области – Дальницкие карьеры – входит в семерку наиболее опасных свалок Украины, а вопрос создания новых мест для

захоронения ТБО является актуальным. Согласно Паспорту жилищно-коммунального хозяйства, в 2013 г. в Одесской области образовалось 5,67 млн. м³ или 989,7 тыс. т ТБО. Основные параметры Национальной модели применительно к Одесской области взяты из работ [3, 4, 7]. При работе с IPCC Waste Model значения DOC , k и MCF , морфологический состав ТБО приняты для Одесской области из работ [3, 4, 7]. При работе с LandGEM Version 3.02 значения параметров k и L_0 заданы для Одесской области на основании результатов расчетов (табл. 4). Выбраны следующие компоненты биогаза: метан, диоксид углерода и НЛОС.

4.1 Уточнение параметра MCF

Одним из параметров, который используется во всех моделях, является MCF , значение которого зависит от типа свалки или от соотношения между различными типами свалок, если расчеты проводятся для территории. В Национальном Кадастре [2] для 2013 г. предлагается среднее значение $MCF = 0,726$. Там же указано, что свалки, расположенные вблизи городов с населением 50 тыс. человек и более, представляют собой образования с глубиной отходов более 5-10 м и могут быть отнесены к неуправляемым глубоким свалкам ($MCF = 0,8$). Свалки около населенных пунктов с количеством жителей менее 50 тыс. не достигают глубины 5 м и могут быть отнесены к неуправляемым неглубоким свалкам ($MCF = 0,4$). К управляемым полигонам ($MCF = 1,0$), согласно [8], относят контролируемые места удаления отходов, когда отходы направляются на специальные площадки, где в определенной мере контролируются выбросы и защита от возгорания и должно соблюдаться хотя бы одно из условий: укрытие отходов, механическое уплотнение или послойная укладка.

Для уточнения значения параметра MCF для Одесской области представим распределение годового объема ТБО по свалкам области с учетом фактического количества поступающих отходов на наиболее крупные свалки, а в случае отсутствия данных – на основе удельного образования ТБО и количества жителей (рис. 1).

В соответствии с представленным распределением (рис. 1), значение параметра MCF для Одесской области составляет 0,63. Также необходимо отметить, что, в случае отнесения полигона Дальницкие карьеры к категории управляемых, значение параметра MCF увеличится до 0,74.

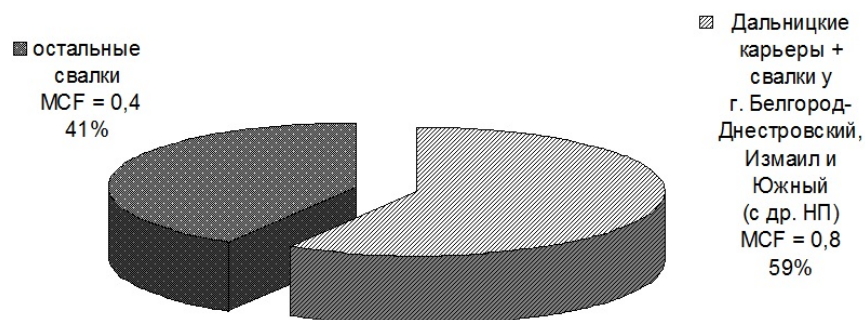


Рис. 1 – Распределение годового объема ТБО Одесской области по свалкам

Результаты расчета величины эмиссии метана в результате размещения годового (за 2013 г.) объема ТБО Одесской области на свалках и полигонах представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты расчета эмиссии биогаза и/или его компонентов от захоронения годового объема (за 2013 г.) ТБО Одесской области

Показатели	Методики		
	Национальная модель	IPCC	LandGEM
Эмиссия метана на 2014 г., т	1602,11	1452	6339 / 3194*
Расчетный период продуцирования, год	–	80	80 / 140
Суммарная эмиссия метана за период продуцирования, т	29216,08	27092,89	44162,90
Эмиссия других ПГ на 2014 г., т	–	–	CO ₂ 17390 / 8764,6* НЛОС 272,5 / 137,34*

* с учетом параметра MCF и F

Динамика эмиссии метана за период 2014-2093 гг. из мест захоронения ТБО Одесской области при размещении на них годового объема ТБО представлена на рис. 2.

Как видим из результатов, представленных в табл. 5 и на рис. 2, применение трех расчетных методик дает различные результаты. Более близ-

кими являются результаты, полученные по Национальной модели и модели IPCC. В IPCC Waste Model не учитывается кожа и резина как компоненты ТБО, а также происходит округление данных о морфологическом составе ТБО, чем можно объяснить такие различия.

Модель LandGEM, как сказано в Руководствах [1, 9], разрабатывалась для американских полигонов и на основе данных о них. Как отмечается в работе [1], применительно к украинским условиям модель дает достаточно завышенные результаты. Также к недостаткам можно отнести отсутствие учета морфологического состава ТБО в параметрах k и L_0 , хотя нами были использованы значения по умолчанию (рассчитанные для Одесской области). Недостаток применения модели LandGEM к территориальным единицам заключается в невозможности определения параметра F (что, безусловно, удобнее в случае работы с конкретным полигоном), хотя в Национальной и IPCC моделях это также не учитывается. К преимуществам инструмента LandGEM Version 3.02 можно отнести возможность расчета эмиссии биогаза и других ПГ, а не только метана, как, например, в других моделях. Впрочем, такие результаты можно получить как производные результатов расчетов эмиссии метана. Однако данный факт можно назвать существенной недоработкой в Национальном Кадастре [2]: отсутствие расчетов эмиссии других ПГ, кроме метана, в секторе «Захоронение отходов».

В работе [5] выполнено сравнение лабораторных и расчетных значений эмиссии метана и показано, что расчетные результаты в 2-5 раза выше лабораторных.

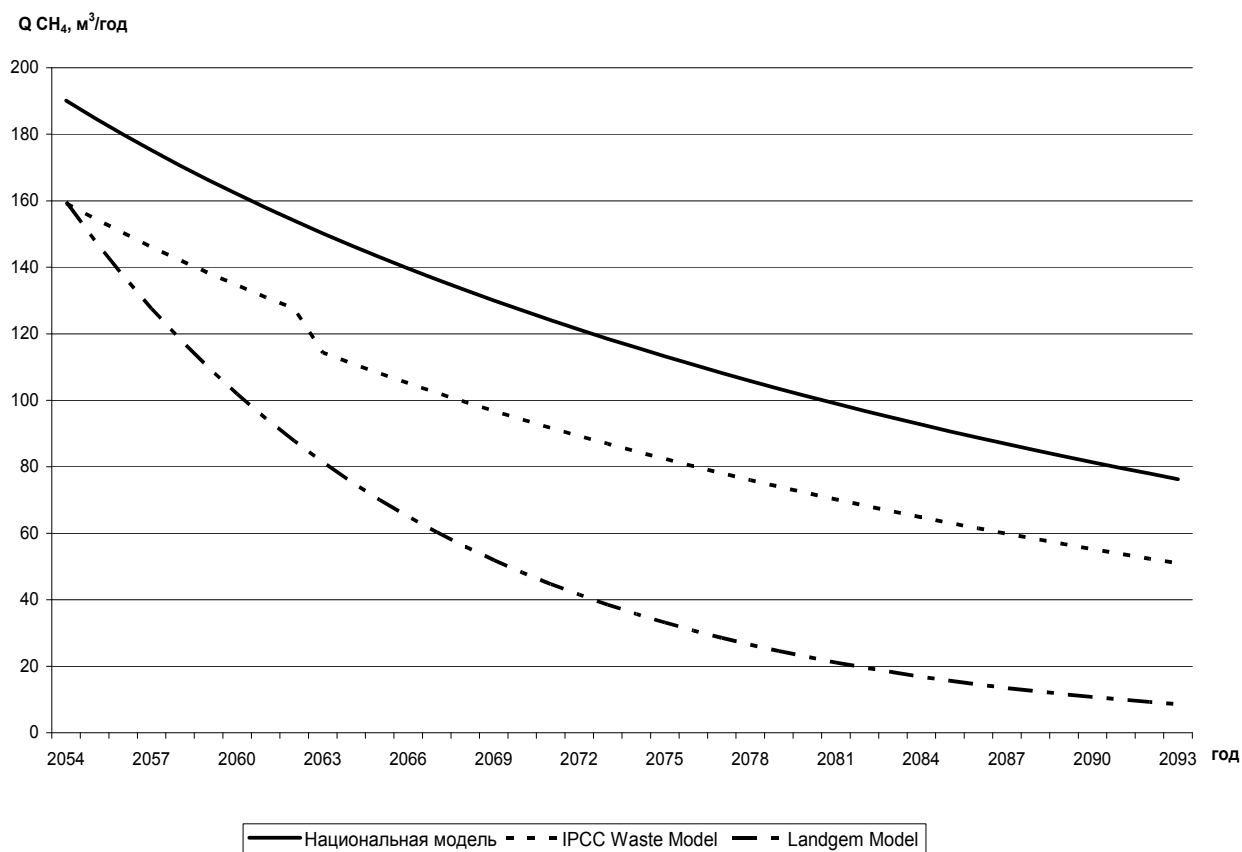
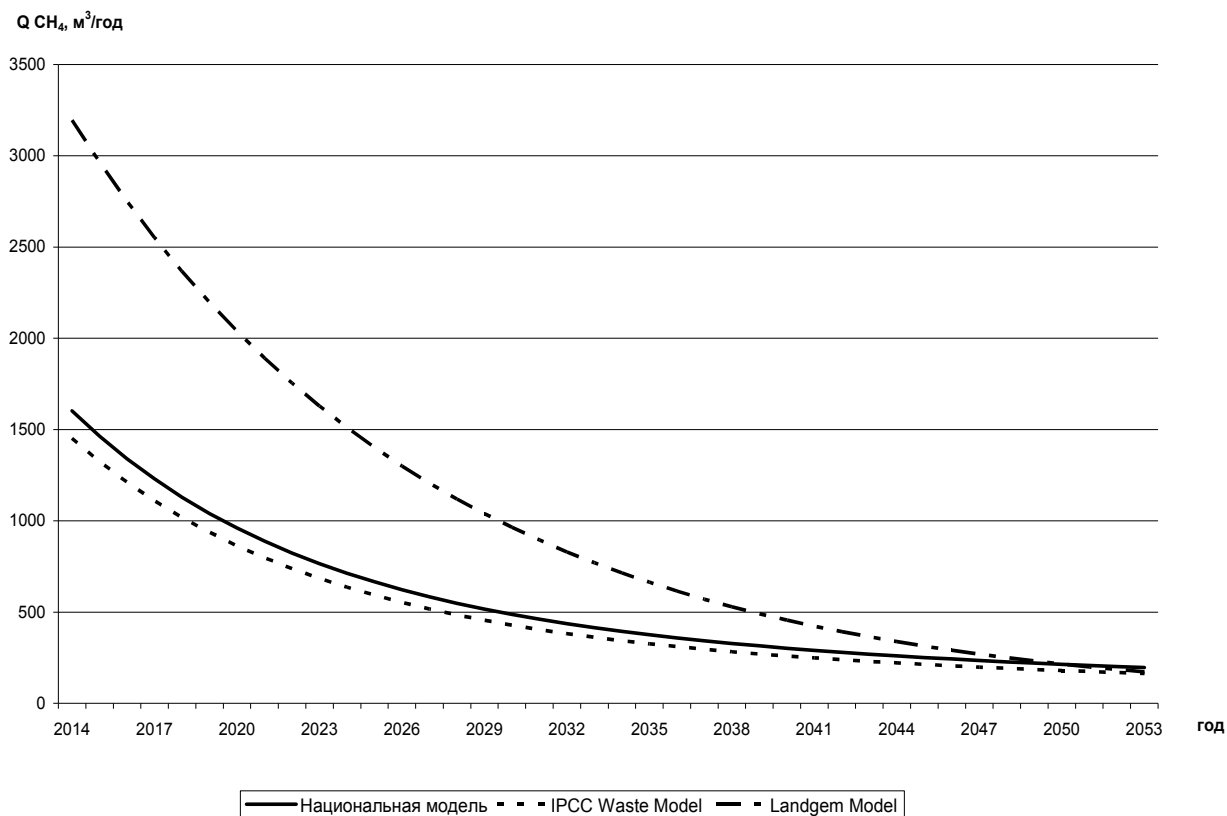


Рис. 2 – Динамика выбросов метана при размещении годового объема ТБО на свалках и полигонах Одесской области

5. ВЫВОДЫ

Проведенная нами адаптация трех наиболее используемых методик расчета эмиссии метана из мест захоронения ТБО позволяет применить их к отдельным объектам или территориальным единицам в Одесской области. Наиболее проработанной представляется Национальная модель газообразования. При проведении расчетов для определенной свалки или полигона удобно воспользоваться LandGEM Version 3.02. Комплексные результаты расчетов можно получить при использовании электронных таблиц IPCC Waste Model.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучшие методы реализации биогазовых энергетических проектов на полигонах ТБО. Агентство защиты окружающей среды США. 2012. 139 с. / отв. ред. пер. Ю. Б. Матвеев. URL: <http://biomass.kiev.ua/useful-info/background-materials/1120-gmi-brochure> (дата обращения 17.01.2017).
2. Национальный Кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990-2013 гг. Киев, 2015. 569 с. // Міністерство екології та природних ресурсів України: сайт. URL: http://www.menr.gov.ua/docs/klimatychna-polityka/UKR_NIR_2015_final.pdf
3. Шмарин С. Л., Сливинская В. В., Ремез Н. С., Филозоф Р. С., Нахшина А. Д., Михайленко В. П. Влияние климатических факторов на оценку выбросов парниковых газов с мест захоронения твердых бытовых отходов в Украине // Фізична географія та геоморфологія. 2014. Вип. 2(79). С. 133-140.
4. Шмарин С. Л., Алексеев И. Л., Филозоф Р. С., Ремез Н. С., Денафас Г. Содержание биоразлагаемых компонентов в составе твердых бытовых отходов в Украине // Экология и промышленность. 2014. № 1. С. 79-83.
5. Пухнюк А. Ю. Исследование газообразования на старых украинских полигонах твердых бытовых отходов // Пром. теплотехника. 2011. Т. 34 (№ 4). С. 83-93.
6. Матвеев Ю. Б., Пухнюк А. Ю. Полигоны бытовых отходов: ситуация и перспективы // Твердые бытовые отходы. 2013. № 6. С. 37-42. URL: <http://uabio.org/img/files/news/pdf/msw-landfills-situation-matveev-pukhniuk.pdf> (дата обращения 17.01.2017).
7. Swapura Ganguli, G. Alex Stege (Eds). *Ukraine Landfill Gas Model Ver.1.0: User's Manual*. U.S. EPA. Washington: U.S. EPA Landfill Methane Outreach Program. 2009. 28 p. URL:

- https://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_manual.pdf (accessed 17 January 2017).
8. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006. Т. 5 Отходы. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol5.html> (дата обращения 17.01.2017)
9. *Landfill Gas Emission Model (LandGEM) Ver. 3.02: User's Guide*. U.S. EPA. Washington: U.S. EPA. 2005. 48 p. URL: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/landgem-v302-guide.pdf> (accessed 17 January 2017)
10. Волынкина Е. П., Домнин К. И. Математическая модель для прогнозных расчетов образования и извлечения свалочного газа на закрытых свалках ТБО // Вестник Сибирского государственного промышленного университета. 2014. № 3(9). С. 62-70.
11. Сафранов Т. А., Приходько В. Ю., Шанина Т. П. Проблема розміщення відходів на звалищах та полігонах Одеської області // Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. 2016. Вип. 14. С. 83-90.

REFERENCES

1. *International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Project*. EPA, 2012. 140 p. (Russ. Ed. Yu. Matveev. Luchshie metody realizatsii biogazovykh energeticheskikh projektov na poligonakh TBO). URL: http://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_IBPGcomplete.pdf (accessed 17 January 2017).
2. National Inventories of anthropogenic emissions from sources and removal by greenhouse gases absorbers in Ukraine in 1990-2013. *Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine: website*. Kyiv, 2015. 569 p. URL: http://www.menr.gov.ua/docs/klimatychna-polityka/UKR_NIR_2015_final.pdf (In Russian)
3. Shmarin S. L., Slivinskaya V. V., Remez N. S., Filozof R. S., Nakhshina A. D., Mykhaylenko V. P. Influence of climatic factors on estimation of greenhouse gas emissions from the burial place solid waste in Ukraine. *Fizichna heohrafiya ta heomorfolohiya. – Physical geography and geomorphology*, 2014, vol. 2(79), pp. 133-140. (In Russian).
4. Shmarin S. L., Alekseevets I. L., Filozof R. S., Remez N. S., Denafas G. The content of biodegradable components in municipal solid waste in Ukraine. *Ekologiya i promyshlennost' – Ecology and industry*, 2014, vol. 1, pp. 79-83. (In Russian).
5. Puhnyuk A. Yu. *Prom. teplotekhnika – Industrial heat engineering*, 2011, Vol. 34 (№ 4), pp. 83-93. (In Russian).
6. Matveev Yu. B., Pukhnyuk A. Yu. Tverdye bytovye otkhody – The municipal solid waste, 2013, no. 6, pp. 37-42. URL: <http://uabio.org/img/files/news/pdf/msw-landfills-situation-matveev-pukhniuk.pdf>. (Accessed 17 January 2017). (In Russian).

7. Swapura Ganguli, G. Alex Stege (Eds). *Ukraine Landfill Gas Model Ver.1.0: User's Manual*. U.S. EPA. Washington: U.S. EPA Landfill Methane Outreach Program. 2009. 28 p. URL: https://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_manual.pdf (accessed 17 January 2017).
8. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006, vol. 5: *Waste*. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html> (Accessed 17 January 2017).
9. *Landfill Gas Emission Model (LandGEM) Ver. 3.02: User's Guide*. U.S. EPA. Washington: U.S. EPA. 2005. 48 p. URL: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/landgem-v302-guide.pdf> (accessed 17 January 2017)
10. Volynkina E. P., Domnin K. I. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta – Bulletin of Siberian state industrial university*, 2014, 3(9), pp. 62-70. (In Russian)
11. Safranov T. A., Prikhod'ko V. Yu., Shanina T. P. *Visnik Kharkivs'koho natsional'noho universitetu im. V. N. Karazina – Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv national university*, 2016, vol. 14, pp. 83-90.

ESTIMATION OF GREENHOUSE GASES EMISSION FROM THE SITES OF MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSAL: CRITICAL ANALYSIS OF METHODS AND ADAPTATION TO THE CONDITIONS OF THE ODESSA REGION

T. A. Safranov, Dr. Sci. (Geol.-Min.)

V. Yu. Prykhodko, Cand. Sci. (Geogr.)

T. P. Shanina, Cand. Sci. (Chem.)

*Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine, vks26@ua.fm*

The article presents an overview of the most used methods for calculation of the landfill gas emission and/or its components from the municipal solid waste disposal sites. Landfill gas is a product of anaerobic decomposition of organic part of municipal solid waste and consists of two main greenhouse gases – methane and carbon dioxide. The first calculating method observed in the paper is National multicomponent Model, which is used in National Inventories of greenhouse gases in Ukraine. Other models are the IPCC Model and LandGEM Model. It was shown, that National Model is based on the IPCC Model and includes some elements from LandGEM Model in type adapted to Ukrainian condition.

On the basis of critical analysis of models we describe their advantages, disadvantages and the possibility of synthesis. National Model accounts more municipal solid waste components than other models. But LandGEM Model allows making calculation not only for methane, but also for another greenhouse gases. All of models, presented in the paper, operate with similar sets of parameters, so they can be interchangeable.

The adaptation of the models to the conditions of Odessa region is presented. The set of modeling parameters for Odessa region conditions is formed on the basis of particular researches and own calculations. In particular we received the mean of the methane correction factor as a weighted average for all disposal sites in the region. The results of calculations of greenhouse gases emissions from disposal the annual volume of municipal solid waste at landfills and dumps are shown. According to the results we can recommend to use the National model for making calculation of methane emission from waste disposal sites.

Keywords: Municipal Solid Waste, Greenhouse Gases, Methane, Emission, Model.

ОЦІНКА ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ВІД МІСЦЬ ЗАХОРОНЕННЯ ТПВ: КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДИК ТА АДАПТАЦІЯ ДО УМОВ ОДЕСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Т. А. Сафранов, проф., д-р геол.-мінер. наук

В. Ю. Приходько, доц., канд. геогр. наук

Т. П. Шанина, доц., канд. хім. наук

*Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, vks26@ua.fm*

У статті представлений огляд найбільш використовуваних методик для розрахунку емісії біогазу та/або його компонентів від місць захоронення твердих побутових відходів. Серед них: Національна багатокomпонентна модель, IPCC та LandGEM моделі, які представлені в оригінальному і адаптованому до українських умов варіантах. На основі критичного аналізу моделей наведено їх переваги, недоліки та показано можливості синтезу. Представлена адаптація моделей до умов Одеської області та показано результати розрахунків емісії парникових газів при захороненні річного обсягу твердих побутових відходів на полігонах та звалищах.

Ключові слова: тверді побутові відходи, парникові гази, метан, емісія, модель.

Дата першого подання: 23. 02. 2017

Дата надходження остаточної версії: 10. 04. 2017

Дата публікації статті: 29. 06. 2017