

doi: 10.5862/MCE.58.5

## Оценка зонального распределения метана на полигонах ТБО северных регионов для его использования местной энергетикой

### Assessment of zonal distribution of methane on MSW landfills in northern regions for its usage in local power engineering

*Канд. техн. наук, заведующий кафедрой*

*А.Н. Чусов,*

*д-р техн. наук, профессор В.И. Масликов,*

*старший преподаватель Д.В. Молодцов,*

*аспирант В.В. Жажков,*

*инженер О.А. Рябухин,*

*Санкт-Петербургский политехнический*

*университет Петра Великого*

*A.N. Chusov,*

*V.I. Maslikov,*

*D.V. Molodtsov,*

*V.V. Zhazhkov,*

*O.A. Riabuokhin,*

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic*

*University*

**Ключевые слова:** биогаз; полигон ТБО; теплоснабжение; электроснабжение; газоснабжение; отходы; метан; энергетический потенциал; холодный климат.

**Key words:** biogas; MSW landfill; heat supply; gas supply; electricity supply; waste; methane; energy potential; cold climate.

**Аннотация.** Полигоны твердых бытовых отходов (ТБО) являются источниками выбросов биогаза, содержащего метан, который может быть использован для нужд местной энергетики. Объекты, расположенные в северных регионах, из-за неблагоприятных климатических условий традиционно считаются неперспективными для добычи и использования биогаза, но объективных подтверждений этому нет. Была поставлена задача оценки зонального распределения метана ряда таких полигонов с целью определения их энергетического потенциала. Это требует проведения специальных натурных исследований, позволяющих получить данные о составе и интенсивности эмиссии биогаза, характеризующие процессы, происходящие в теле полигона. Следует отметить, что использование математических моделей, не в полной мере отражающих специфику конкретного полигона, не позволяет получить достоверную информацию о его биогазовом потенциале. В данной работе приведены результаты исследований по оценке биогазового потенциала трех городских полигонов ТБО, расположенных в различных природно-климатических зонах Северо-Западного федерального округа с атлантико-континентальным и умеренно-континентальным климатом. Исследования показали, что биохимические процессы разложения отходов с выделением биогаза с высокой концентрацией метана (50 % об. и более) могут активно протекать в условиях относительно сурового климата. Это подтверждает наличие энергетического потенциала подобных полигонов, который может быть использован для нужд тепло-, электро- и газоснабжения населения и других целей.

**Abstract.** Municipal solid waste (MSW) landfills located in regions of Russia with low temperatures and relatively low rainfall averages are considered unpromising in terms of their biogas potential; however, these claims have not been substantiated. Assessment of the biogas potential of such landfills requires special field research for analyzing biogas composition and emission speed, which could define the processes taking place inside a landfill. We should note that the use of mathematical models that do not take into account the specifics of a particular landfill makes it impossible to get detailed and reliable information about its biogas potential. This work contains the results of research conducted for assessing the biogas potential of three municipal solid waste landfills located in various zones of the Northwestern Federal District with Atlantic continental and moderately continental climate. The research showed that biochemical processes of waste decomposition accompanied by the emission of biogas with high (50 vol% and above) methane content are possible even in areas with a relatively cold climate. This confirms the presence of the energy potential of these landfills, which can be used for the needs of heat, electricity and gas supply to the population, etc.

В Российской Федерации ежегодно образуется около 55...60 млн. т. твердых бытовых отходов, основная часть которых (~93 %) захоранивается на полигонах и свалках [1, 2].

В процессе эксплуатации полигонов и после их закрытия в течение длительного времени наблюдаются выбросы биогаза, содержащего метан (до 60 % об.) – ценное топливо и сильный парниковый газ. В зависимости от объема свалочных масс выбросы биогаза составляют от нескольких десятков и сотен литров в секунду (малые и небольшие полигоны) до нескольких десятков кубических метров в секунду (крупные и крупнейшие полигоны). Таким образом, рядом с населенными пунктами существуют стабильные и доступные источники антропогенного метана. Известно, что теплотворная способность биогаза в среднем составляет 6 кВт·ч/м<sup>3</sup> (21,6 МДж/м<sup>3</sup>). По теплотворной способности 1 м<sup>3</sup> биогаза эквивалентен 0,6 литров нефтепродуктов [3]. Сегодня в мире реализовано большое количество проектов по использованию свалочного биогаза для тепло-, электро- и газоснабжения населения, для нужд транспорта и различных производственных процессов. Установка, работающая на биогазе относительно небольшого полигона, может обеспечить энергией и теплом около 100 домов.

Естественные выбросы биогаза представляют опасность для окружающей среды, так как являются одной из главных причин возгорания свалочных масс с выбросами особо опасных веществ. Кроме того, при разложении отходов образуется токсичный фильтрат, загрязняющий поверхностные и грунтовые воды. В результате состояние многих полигонов не соответствует современным экологическим требованиям.

Особую остроту и важность проблема эксплуатации полигонов ТБО приобретает в северных регионах страны с холодным климатом. С одной стороны, относительная бедность муниципалитетов, неразвитость систем обращения отходов, сложность их захоронения в условиях длительного промерзания грунтов являются одними из причин плохого состояния многих полигонов. С другой стороны, для тепло-, электро- и газоснабжения населения завозится дорогостоящее топливо, экономия которого возможна за счет использования местных видов энергоресурсов, в частности, свалочного биогаза [4–6].

Одним из таких регионов является Северо-Западный федеральный округ, где ежегодно образуется более 5,5 млн. т. ТБО [7]. Ряд полигонов, в том числе крупных, в ближайшее время должен быть закрыт и рекультивирован [8, 9]. Для уменьшения эмиссий загрязняющих веществ в окружающую среду полигоны должны иметь эффективные системы инженерной защиты, тип которых определяется их состоянием, составом и эмиссией биогаза и фильтрата, образующихся при разложении отходов. Полноценной, обеспечивающей экологическую безопасность полигона, но относительно дорогой является система, предусматривающая сбор биогаза. Такая система представляет собой сложное инженерное сооружение, включает верхнее и нижнее многослойные изолирующие покрытия, газовые скважины, коллекторную и дренажную сети для отвода биогаза и фильтрата, очистное оборудование и др. [10–14]. Снизить затраты на обустройство полигона можно путем получения дополнительного дохода при использовании биогаза в качестве топлива для нужд местной энергетики, а также путем продажи квот на выбросы парниковых газов [15–18]. Таким образом, вид рекультивации во многом будет зависеть от биогазового потенциала полигона [19–23].

Эффективность использования энергетического потенциала полигона ТБО во многом будет определяться достоверными оценками эмиссии биогаза, что представляет собой сложную научно-техническую задачу [22]. Разные объемы и морфологический состав отходов, время и способ их захоронения, климатические условия, температурный режим и др. обуславливают изменчивость состава, мозаичность распределения газовых эмиссий на поверхности тела полигона, сезонные и годовые колебания выбросов биогаза. Это затрудняет создание универсальных математических моделей, адекватно отражающих специфику функционирования конкретных полигонов. Применение известных математических моделей [24], учитывающих ограниченное количество факторов, приводит к большим погрешностям в определении биогазового потенциала. В результате реальная энергоотдача дорогостоящих систем сбора и использования биогаза оказывается значительно ниже проектной, ухудшаются экономические показатели.

Возникает потребность в разработке и апробации методов оценки и прогноза эмиссии биогаза с полигонов, позволяющих с использованием относительно недорогого оборудования получать достоверные данные об их энергетическом потенциале. Это требует проведения многоэтапных специальных натурных и лабораторных исследований [25] для получения необходимой информации о составе биогаза, величине текущей эмиссии, динамике ее изменения во времени и объемах. На первом этапе проводится газогеохимическая съемка поверхности тела полигона. Это позволяет определить состав биогаза и выделить участки полигона с высоким

Chusov A.N., Maslikov V.I., Molodtsov D.V., Zhazhkov V.V., Riabuokhin O.A. Assessment of zonal distribution of methane on MSW landfills in northern regions for its usage in local power engineering

содержанием метана. Следующая стадия исследований – определение удельных объемов эмиссии биогаза этих участков. Для этого могут быть использованы следующие методы: аналитический, скважинный, с помощью бокса-газоуловителя и др. [26–29].

Для условий российских полигонов рекомендуется производить оценку интенсивности эмиссии биогаза из верхнего слоя с использованием газоуловителя в виде специального бокса (flux box), в котором собирается выделяющийся на исследуемых участках биогаз. Эмиссия метана ( $F$ ) на исследуемом участке может определяться с использованием зависимости (1) [30, 31]:

$$F = \frac{V}{A} \left( \frac{dC}{dt} \right), \text{ [мг/(м}^2 \cdot \text{с)]}, \quad (1)$$

где  $V$  – объем камеры [м<sup>3</sup>],  $A$  – площадь камеры [м<sup>2</sup>],  $dC/dt$  – изменение концентрации метана во времени [мг/(м<sup>3</sup>·с)].

С учетом влияния метеопараметров эмиссию метана  $F$  [мг·м<sup>-2</sup>·ч<sup>-1</sup>] можно определить с использованием зависимости (2) [32]:

$$F = \frac{D_{ppm} \cdot P \cdot V \cdot M}{D_{time} \cdot A \cdot T \cdot R}, \text{ [мг·м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}], \quad (2)$$

где  $D_{ppm}$  – разность концентраций [ppm],  $D_{time}$  – промежуток времени [ч],  $P$  – давление [Па],  $V$  – объем камеры [м<sup>3</sup>],  $M$  – молярная масса метана [кг/моль],  $A$  – площадь камеры [м<sup>2</sup>],  $T$  – температура [К],  $R$  – газовая постоянная [8,3145 Па·м<sup>3</sup>·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>].

Зная площадь участков, нетрудно определить общий выброс биогаза. Следует отметить, что эти исследования позволяют только определить эмиссию на текущее время, но не прогнозировать даже на ближайшую перспективу, поэтому важным этапом является лабораторный эксперимент.

Технология лабораторного моделирования состоит в том, что исследуемый материал помещают в герметично закрытый биореактор, в котором поддерживается режим, соответствующий условиям полигона.

Создавая оптимальные условия в биореакторах, можно ускорить разложение отходов в десятки и более раз и за несколько месяцев работы лабораторной установки собрать информацию о процессах, происходящих в естественных условиях в течение многих десятков лет. Полученные результаты могут быть использованы при выборе математических моделей и их корректировке под условия конкретного полигона для прогноза динамики его биогазового потенциала [25].

Температура воздуха и количество осадков в зоне размещения полигонов имеет определяющее значение для разложения отходов, а следовательно, для динамики образования биогаза и его состава [33]. Полигоны ТБО, расположенные в регионах РФ с низкими температурами воздуха и относительно небольшим количеством осадков, считаются неперспективными объектами для использования биогазового потенциала. Однако достоверных подтверждений этому нет.

В данной статье основное внимание уделено начальному этапу исследований – проведению газогеохимической съемки на таких полигонах с целью получения предварительной информации о биогазовом потенциале, данных о пространственном распределении основных компонентов биогаза на различных участках захоронения для районирования территории полигона по степени насыщенности метаном и др. Была поставлена задача выявить зоны с высокой концентрацией метана (50 % об. и более), перспективные для добычи биогаза. В качестве примера приведены результаты исследований по оценке биогазового потенциала трех городских полигонов ТБО, расположенных в различных природно-климатических зонах Северо-Запада [34]. Полигон №1 (ТБО №1) расположен в регионе с атлантико-континентальный климатом, средняя температура января –6,6 °С, июля – +18,3 °С. Годовое количество осадков – 625 мм. Среднегодовая температура воздуха в зоне размещения полигонов равна 5,4 °С. Площадь полигона №1 составляет более 40 га, его эксплуатация начата в 1999 году. Состояние полигона может оцениваться как удовлетворительное. В настоящее время на полигон вывозится около 900 тыс. т. отходов в год. Предполагается создание на полигоне временной газосборной сети, так как это позволит уменьшить выбросы загрязняющих веществ и более полно использовать его биогазовый потенциал.

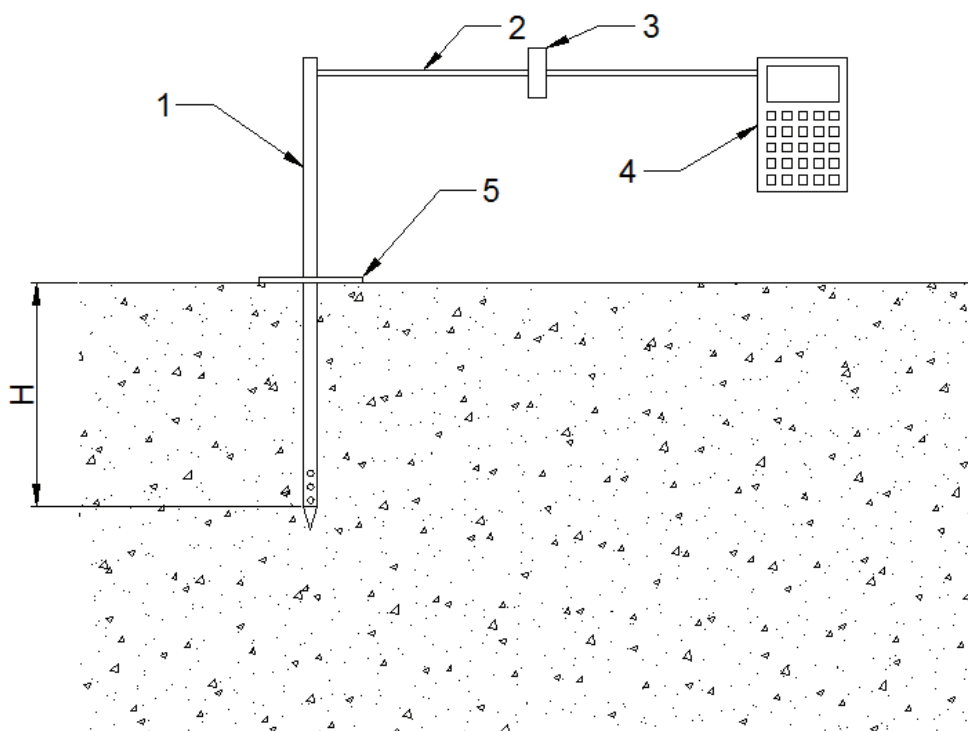
Чусов А.Н., Масликов В.И., Молодцов Д.В., Жажков В.В., Рябухин О.А. Оценка зонального распределения метана на полигонах ТБО северных регионов для его использования местной энергетикой

Полигоны №2 и №3 (ТБО №2 и ТБО №3) расположены в зоне с умеренно-континентальным климатом. Средняя температура января  $-15,0^{\circ}\text{C}$ , июля  $+17,2^{\circ}\text{C}$ . Годовое количество осадков – 556 мм. Среднегодовая температура воздуха в зоне размещения полигонов равна  $1,0^{\circ}\text{C}$ . Площадь полигона №2 составляет около 33 га, его эксплуатация начата в 1971 году. В настоящее время на полигон вывозится более 700 тыс.  $\text{м}^3$  отходов в год. Площадь полигона №3 составляет порядка 11 га. Эксплуатация начата в 1966 г.

Полигоны №2 и №3 находятся в неудовлетворительном состоянии, имеются обширные участки возгорания отходов. Предполагается, что эмиссия свалочного метана способствует возникновению пожаров.

### Отбор проб биогаза на полигонах

Газогеохимическая съемка тела полигона производится путем отбора проб биогаза из верхнего слоя захороненных отходов (рис. 1).



**Рисунок 1. Схема отбора проб биогаза из верхнего слоя отходов:**

**1 – пробоотборник (зонд); 2 – газовая линия; 3 – фильтры для защиты газоанализатора от пыли и влаги; 4 – газоанализатор со встроенным побудителем расхода; 5 – ограничительное кольцо;  $H$  – глубина отбора пробы биогаза**

Метод отбора основан на введении зонда 1 в слой отходов на определенную глубину  $H$  с последующей откачкой и анализом состава газа при помощи портативного газоанализатора 4, предназначенного для работы с биогазами различного состава и происхождения непосредственно на месте измерения.

Перед началом работы с газоанализатором осуществляется калибровка нуля азотом высокой чистоты и замена фильтров. Дополнительно может определяться температура на глубине отбора проб при помощи электронного цифрового термометра с выносным датчиком.

Предварительно на ситуационном плане полигона по согласованию с представителями эксплуатирующей организации намечаются участки отбора проб с сеткой не более  $50 \times 50$  м. Конкретные точки отбора проб определяются непосредственно на месте в зависимости от возможности проведения измерений. Для их фиксации целесообразно использовать высокоточный защищенный (по стандарту IPX7) портативный GPS-навигатор. С целью обеспечения безопасности проведения работ при выборе точки отбора пробы бесконтактным

методом измеряется температура отходов на поверхности тела полигона для выявления возможных зон подпочвенного горения свалочных масс.

Исследования на всех полигонах проводились в осенний период. Отбор проб на полигоне ТБО №1 производился при средней температуре воздуха +13 °С. С учетом большой площади полигона измерения были проведены в 90 точках, удаленность соседних точек не более 50 м (рис. 1). Отбор проб производился с глубины 50 см, определялось содержание метана и углекислого газа, а также дополнительно сероводорода, кислорода, угарного газа [35].

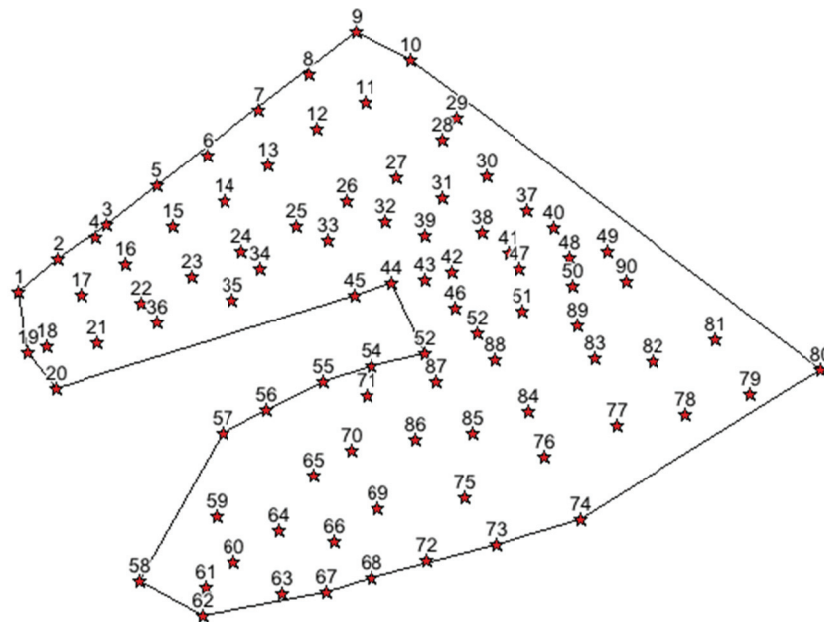


Рисунок 2. Расположение точек отбора проб на теле полигона №1

На рисунке 3 представлены трехмерные карты зонального распределения метана, углекислого газа, сероводорода и кислорода в верхнем слое отходов, позволяющие планировать мероприятия на конкретных участках полигона.

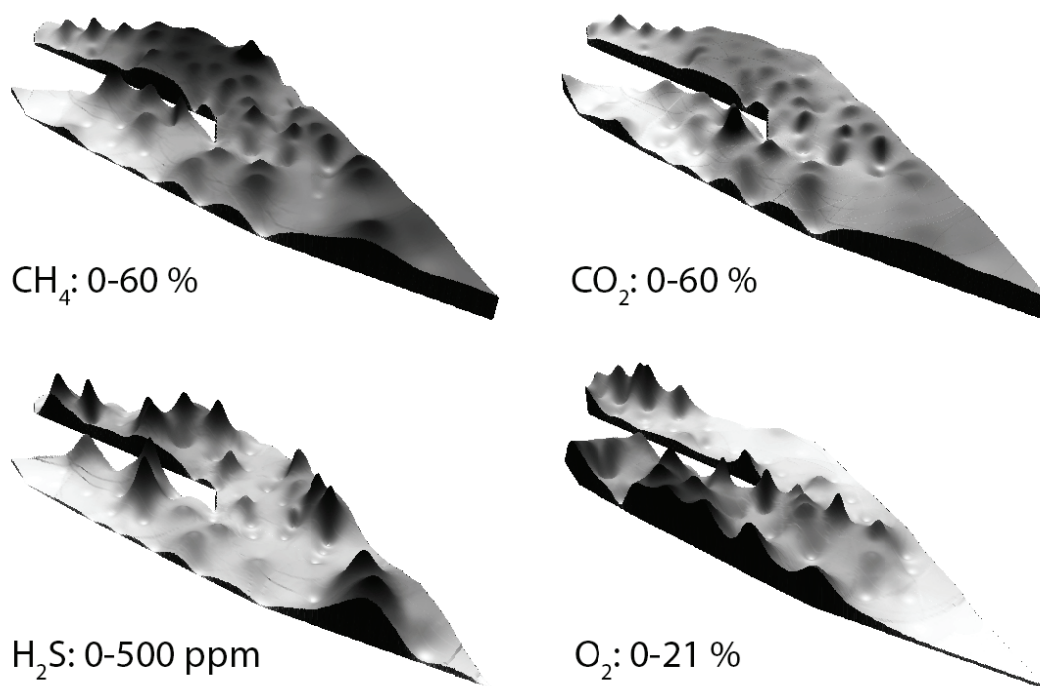


Рисунок 3. Трехмерные карты содержания метана, углекислого газа, сероводорода и кислорода в газе поверхностного слоя отходов полигона ТБО №1

Чусов А.Н., Масликов В.И., Молодцов Д.В., Жажков В.В., Рябухин О.А. Оценка зонального распределения метана на полигонах ТБО северных регионов для его использования местной энергетикой

По результатам исследований на эксплуатируемых участках полигона были выявлены обширные площади с высокой концентрацией метана (60 % об. и более) и, соответственно, с существенным энергетическим потенциалом. Это определило целесообразность создания системы сбора биогаза, ввод в эксплуатацию которой намечен на ближайшее время.

При отборе проб на полигоне ТБО №2 средняя температура воздуха составляла +5 °С. Измерения выполнялись в 49 доступных точках с шагом не более 50 м (рис. 4).

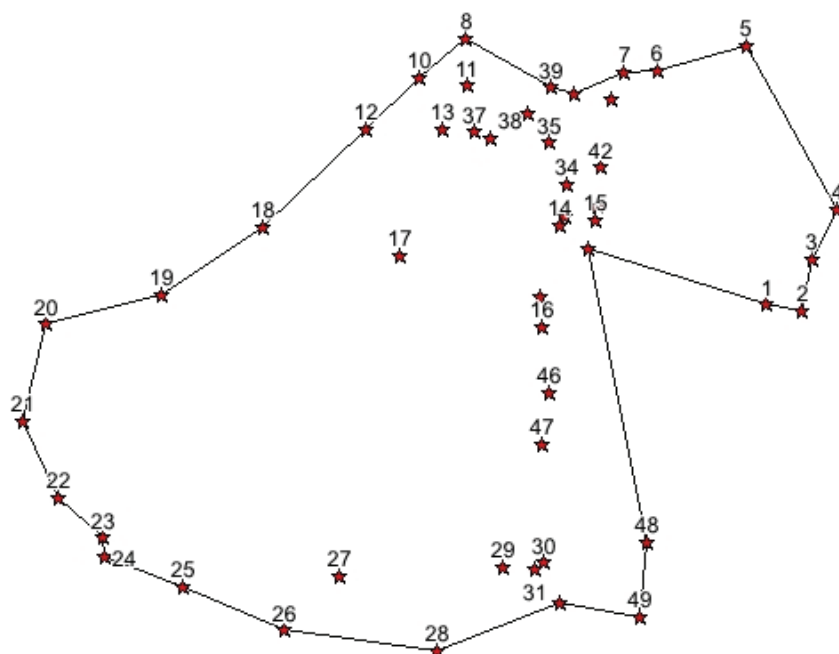


Рисунок 4. Расположение точек отбора проб на теле полигона №2

По результатам исследований состава биогаза были выявлены участки с высокой концентрацией метана (50 % об. и более) (рис. 5) и определен участок, перспективный для создания газосборной системы. К преимуществам его освоения можно отнести отсутствие в пробах монооксида углерода, а также относительно низкие концентрации сероводорода, не более 200 ppm.

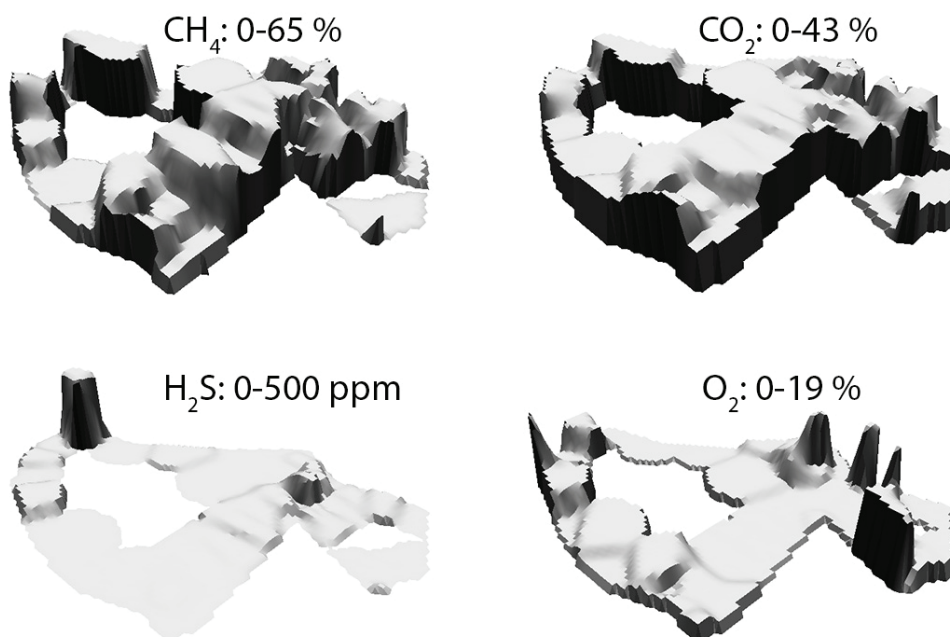
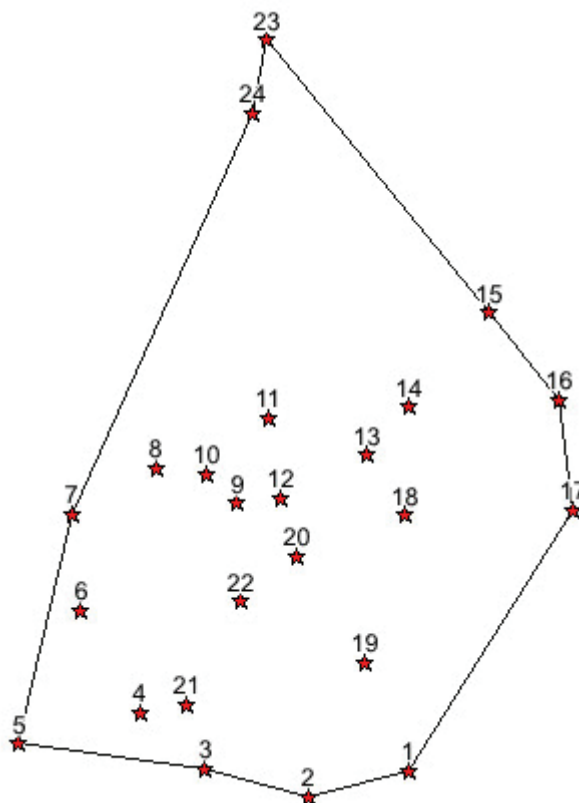


Рисунок 5. Трехмерные карты содержания метана, углекислого газа, сероводорода и кислорода в газе поверхностного слоя отходов полигона ТБО №2

Chusov A.N., Maslikov V.I., Molodtsov D.V., Zhazhkov V.V., Riabuokhin O.A. Assessment of zonal distribution of methane on MSW landfills in northern regions for its usage in local power engineering

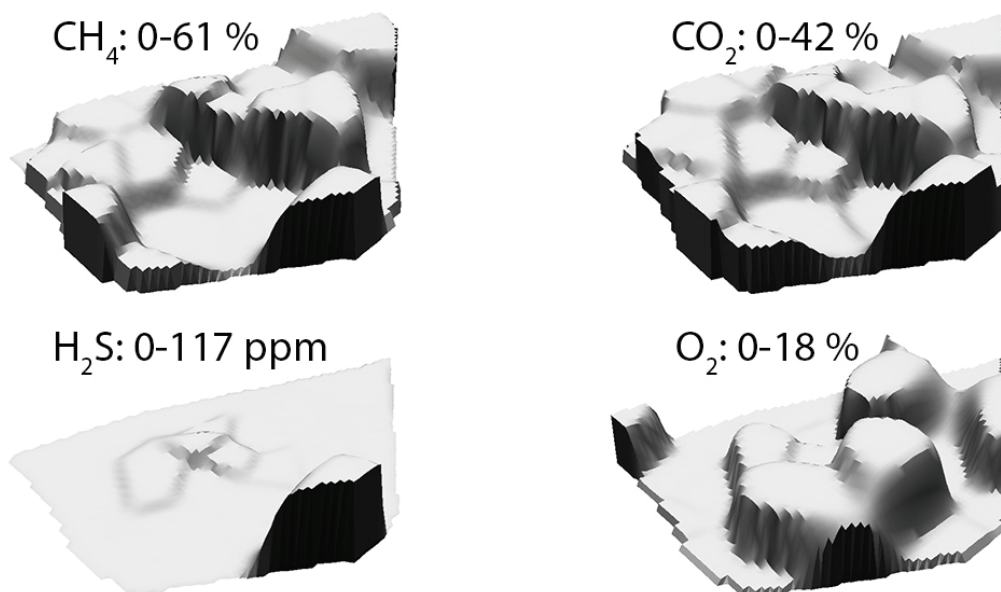
При отборе проб на полигоне ТБО №3 средняя температура воздуха составляла +2 °С. Измерения выполнялись в 24 доступных точках с шагом не более 50 м (рис. 6).



**Рисунок 6. Расположение точек отбора проб на теле полигона №3**

По результатам измерений концентраций компонентов биогаза был выявлен участок с высокой концентрацией метана (50 % об. и более) (рис. 7). На нем зафиксировано отсутствие монооксида углерода, и лишь в отдельных точках наблюдаются низкие концентрации сероводорода, до 30 ppm.

Анализ полученных данных показал, что на полигонах ТБО №2 и №3 участки возгорания отходов примыкают к участкам с высоким содержанием метана.



**Рисунок 7. Трехмерные карты содержания метана, углекислого газа, сероводорода и кислорода в газе поверхностного слоя отходов полигона ТБО №3**

Чусов А.Н., Масликов В.И., Молодцов Д.В., Жажков В.В., Рябухин О.А. Оценка зонального распределения метана на полигонах ТБО северных регионов для его использования местной энергетикой

Таким образом, было установлено, что на обширных участках исследуемых полигонов, расположенных в регионах с холодным климатом, наблюдаются выбросы биогаза с высоким содержанием метана.

Выше было отмечено, что следующим этапом исследований является определение удельной и общей эмиссии биогаза на исследуемых участках с использованием газоуловителя в виде специального бокса. Реализация данного метода требует постоянного присутствия специалистов при проведении соответствующих измерений в течение относительно длительного времени, которое в зависимости от интенсивности газовой эмиссии в месте отбора проб может составлять от нескольких десятков минут до нескольких часов. В течение этого периода возможно негативное влияние содержащихся в биогазе вредных примесей на здоровье людей. Возникает задача сокращения до минимума пребывания людей в зоне установки оборудования, которая может быть решена путем создания автоматизированного комплекса с дистанционным управлением для измерения газовых эмиссий. За рубежом проводятся работы по созданию опытных образцов самоходных мобильных роботов для мониторинга газовых эмиссий, позволяющих осуществлять требуемые повторяющиеся процедуры измерений с гораздо более плотной пространственно-временной детализацией по сравнению с полностью ручными измерениями [36, 37].

Состояние многих российских полигонов (рис. 8) не позволяет полноценно применять подобные системы, поэтому предлагается использовать автоматизированный модуль для измерения газовых потоков камерным методом с поверхности тела полигона. Транспортировка и установка модуля на точку контроля осуществляется специалистом, что позволяет устанавливать ее в труднодоступных местах, но при этом получать необходимые данные, сводя к минимуму нахождение человека в опасной зоне.



**Рисунок 8. Внешний вид действующего полигона ТБО**

Модуль оснащается высокоточным газоанализатором метана, датчиками давления, температуры, скорости ветра и др., программируемым устройством управления с возможностью дистанционного контроля. В настоящее время оборудование проходит лабораторные испытания.

Chusov A.N., Maslikov V.I., Molodtsov D.V., Zhazhkov V.V., Riabuokhin O.A. Assessment of zonal distribution of methane on MSW landfills in northern regions for its usage in local power engineering



## Заключение

1. Рассмотренная методика проведения газогеохимической съемки была согласована с проектными организациями, заинтересованными в использовании энергетического потенциала полигонов, и успешно применена на ряде объектов для получения информации о составе биогаза, пространственном распределении его основных компонентов на различных участках захоронения с целью районирования территории полигона по величине концентрации метана в биогазе и создания эффективных систем дегазации.

2. По результатам проведенных исследований определено, что биохимические процессы разложения отходов могут активно протекать в условиях холодного климата, что характеризуется выделением биогаза с высокой концентрацией метана (50 % об. и более). Это подтверждает возможность использования биогазового потенциала таких полигонов для нужд тепло- и электроснабжения местных потребителей. На основе полученных данных был выполнен проект создания системы сбора и использования биогаза на одном из полигонов с получением тепловой и электрической энергии. В настоящее время там проводятся строительные-монтажные работы.

3. Исследования, проведенные на полигонах, показали, что участки возгорания отходов примыкают к участкам с высоким содержанием метана, выделение которого может являться основной причиной происходящих пожаров. Для снижения риска возникновения пожаров на полигонах необходимо проведение работ по дегазации газопродуктивных участков.

### Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2013 году» Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/6c7/gosdokladeco.pdf> (дата обращения 15.09.2015).
2. Отходы в России: Мусор или ценный ресурс? Сценарии развития сектора обращения с твердыми коммунальными отходами. Отчет Международной финансовой корпорацией (IFC, Группа Всемирного банка). [Электронный ресурс]. URL: <http://tpprf.ru/download.php?GET=6LPAY%2F81BmxXbFD r7vGx5g%3D%3D> (дата обращения 15.09.2015).
3. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Basisdaten Bioenergie Deutschland. August 2013. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Bioenergie-NachwachsendeRohstoffe/FNR-Basisdaten-Bioenergie-2013.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Bioenergie-NachwachsendeRohstoffe/FNR-Basisdaten-Bioenergie-2013.pdf?__blob=publicationFile) (дата обращения: 15.09.2015).
4. Федоров М.П., Масликов В.И. Проблемы утилизации бытовых отходов в условиях северных регионов // Наука и технологии для устойчивого развития северных регионов: Междунар. научн.-практ. конф. Санкт-Петербург, 23 апреля 2003 г. СПб.: Изд-во БАН. 2003. С. 197–200.
5. Хилимонюк В.З., Брушков А.В., Гребенкин С.И. Эколого-геологические проблемы приарктических территорий и возможные пути их решения [Электронный ресурс]. URL: [http://istina.msu.ru/media/publications/articles/c28/2cc/2028638/Environmental\\_\\_probles\\_of\\_Arctic\\_areas\\_and\\_possible\\_e\\_solutions.pdf](http://istina.msu.ru/media/publications/articles/c28/2cc/2028638/Environmental__probles_of_Arctic_areas_and_possible_e_solutions.pdf) (дата обращения 15.09.2015).
6. Ключникова Е.М., Маслобоев В.А. Эколого-экономический анализ региональной политики в сфере обращения с отходами (на примере Мурманской области) // Вестник МГТУ. 2013. Том 16. №2. С. 233–241.
7. Безруких П.П., Дегтярев В.В., Елистратов В.В. [и др.] Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям). М.: ИАЦ Энергия. 2007. 272 с.

### References

1. *Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2013 godu» Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii* [The state report "On the state and Environmental Protection of the Russian Federation in 2013" of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation]. Available at: <https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/6c7/gosdokladeco.pdf> (Accessed 15.09.2015). (rus)
2. *Otkhody v Rossii: Musor ili tsenny resurs? Stsenarii razvitiya sektora obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami* [Wastes in Russia: Rubbish or a valuable resource? Development scenarios for the sector of municipal solid waste]. The report of International Finance Corporation. World Bank Group. Available at: <http://tpprf.ru/download.php?GET=6LPAY%2F81BmxXbFD r7vGx5g%3D%3D> (Accessed 15.09.2015). (rus)
3. *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Basisdaten Bioenergie Deutschland. August 2013.* Available at: [http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Bioenergie-NachwachsendeRohstoffe/FNR-Basisdaten-Bioenergie-2013.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Bioenergie-NachwachsendeRohstoffe/FNR-Basisdaten-Bioenergie-2013.pdf?__blob=publicationFile) (Accessed 15.09.2015).
4. Fedorov M.P., Maslikov V.I. Problemy utilizatsii bytovykh otkhodov v usloviyakh severnykh regionov [Problems of recycling of municipal solid waste in conditions of northern regions]. *Science and Technologies for Sustainable Development of the Northern regions: Intern. scien.-pract. Conf., St.-Petersburg, 23 April 2003.* Saint-Petersburg: BAN, 2003. Pp. 197–200. (rus)
5. Khilimonyuk V.Z., Brushkov A.V., Grebenkin S.I. *Ekologo-geologicheskie problemy priarkticheskikh territoriy i vozmozhnye puti ikh resheniya* [Ecological and geological problems of the Subarctic areas and possible solutions]. Available at: [http://istina.msu.ru/media/publications/articles/c28/2cc/2028638/Environmental\\_\\_probles\\_of\\_Arctic\\_areas\\_and\\_possible\\_solutions.pdf](http://istina.msu.ru/media/publications/articles/c28/2cc/2028638/Environmental__probles_of_Arctic_areas_and_possible_solutions.pdf) (Accessed 15.09.2015). (rus)
6. Klyuchnikova E.M., Masloboev V.A. *Ekologo-ekonomicheskiy analiz regional'noy politiki v sfere obrashcheniya s otkhodami (na primere Murmanskoy oblasti)* [The ecological and economic analysis of the regional policy in the field of waste management (on the example of the Murmansk region)]. *Vestnik of MSTU.* 2013.

Чусов А.Н., Масликов В.И., Молодцов Д.В., Жажков В.В., Рябухин О.А. Оценка зонального распределения метана на полигонах ТБО северных регионов для его использования местной энергетикой

8. Флоринская Т.М. Экологическая безопасность Северо-Западного региона [Электронный ресурс]. URL: [http://www.spbrc.nw.ru/ru/councils/ecology/publications/eco\\_safety](http://www.spbrc.nw.ru/ru/councils/ecology/publications/eco_safety) (дата обращения 15.09.2015).
9. Долгосрочная целевая инвестиционная программа обращения с твёрдыми бытовыми и промышленными отходами в Санкт-Петербурге на 2012–2020 годы. Раздел 1. Анализ существующей системы обращения с твёрдыми бытовыми и промышленными отходами в Санкт-Петербурге. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/toxic\\_s/recycle/LIP-part1.pdf](http://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/toxic_s/recycle/LIP-part1.pdf) (дата обращения 15.09.2015).
10. Чечевичкин В.Н., Ватин Н.И. Особенности состава и очистки поверхностного стока крупных городов // Инженерно-строительный журнал. 2014. №6(50). С. 67–74.
11. Чечевичкин В.Н., Ватин Н.И. Экономическая очистка поверхностного стока в крупных городах // Евростройпрофи. 2015. №78. С. 48–52.
12. Вайсман Я.И., Глушанкова И.С. Условия образования и очистки фильтрационных вод полигонов захоронения ТБО: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та. 2003. 167 с.
13. Вайсман Я.И., Коротаев В.Н., Петров В.Н. и др. Управление отходами. Полигоны захоронения ТБО: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та. 2007. 463 с.
14. Госстрой России. Рекомендации по расчету образования биогаза и выбору систем дегазации полигонов захоронения твердых бытовых отходов. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та. 2003. 27 с.
15. National Renewable Energy Laboratory. Energy Analysis. Biogas Potential in the United States. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60178.pdf> (дата обращения: 15.09.2015).
16. Glover B. Biogas Capture and Utilization: An Effective, Affordable Way to Reduce Greenhouse Gas Emissions and Meet Local Energy Needs. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.eesi.org/files/biogas\\_issuebrief\\_061609.pdf](http://www.eesi.org/files/biogas_issuebrief_061609.pdf) (дата обращения: 15.09.2015).
17. Jaramillo P., Matthews H.S. Landfill-Gas-to-Energy Projects: Analysis of Net Private and Social Benefits. // *Environmental science & technology*. 2005. Vol. 39. №19. Pp. 7365–7373.
18. Shanjun Li, Han Kyul Yoo, Macauley M. [et al.] Assessing the role of renewable energy policies in landfill gas to energy projects // *Energy Economics*. 2015. Vol. 49. Pp. 687–697.
19. Федоров М.П., Зинченко А.В., Кораблев В.В. и др. Энергетическое использование эмиссии метана на полигоне твердых бытовых отходов Санкт-Петербурга для сокращения парниковых выбросов и привлечения инвестиций в рекультивацию // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2008. №6(70). С. 135–142.
20. Метан со свалок ТБО. Федеральное агентство по науке и инновациям. М.: РУСДЕМ-Энергоэффект. 2009. 80 с.
21. Масликов В.И., Чусов А.Н., Молодцов Д.В., Рыжакова М.Г. Зональное определение эмиссий биогаза на полигоне ТБО для оценки геоэкологического состояния и обоснования управления процессами разложения отходов при рекультивации // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. №2-1(147). С. 260–265.
22. Федоров М.П., Кораблев В.В., Масликов В.И., Иокша Е.О. Аудит для «углеродных» инвестиций в энергетическое использование полигонов твердых бытовых отходов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 44 с.
- Vol. 16. No. 2. Pp. 233–241. (rus)
7. Bezrukikh P.P., Degtyarev V.V., Elistratov V.V. et al. *Spravochnik po resursam vozobnoviaemyh istochnikov energii Rossii i mestnym vidam topliva (pokazateli po territoriiam)* [Guide to renewable energy resources in Russia and local fuels (indicators for the territories)]. Moscow: Energiya. 2007. 272 p. (rus)
8. Florinskaya T.M. *Ekologicheskaya bezopasnost' Severo-Zapadnogo regiona* [Environmental safety of North-West region]. Available at: [http://www.spbrc.nw.ru/ru/councils/ecology/publications/eco\\_safety](http://www.spbrc.nw.ru/ru/councils/ecology/publications/eco_safety) (Accessed 15.09.2015). (rus)
9. *Dolgosrochnaya tselevaya investitsionnaya programma obrashcheniya s tvyerdymi bytovymi i promyshlennymi otkhodami v Sankt-Peterburge na 2012 – 2020 gody. Razdel 1. Analiz sushchestvuyushchey sistemy obrashcheniya s tvyrdymi bytovymi i promyshlennymi otkhodami v Sankt-Peterburge* [The long-term target investment program for the treatment of municipal solid and industrial waste in St.-Petersburg on 2012 – 2020 years. Section 1. The analysis of the existing treatment system of municipal solid and industrial wastes in St.-Petersburg]. Available at: [http://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/toxic\\_s/recycle/LIP-part1.pdf](http://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/toxic_s/recycle/LIP-part1.pdf) (Accessed 15.09.2015). (rus)
10. Chechevichkin V.N., Vatin N.I. Osobennosti sostava i ochistki poverkhnostnogo stoka krupnykh gorodov [Specifics of surface runoff contents and treatment in large cities]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No. 6(50). Pp. 67–74. (rus)
11. Chechevichkin V.N. Vatin N.I. Ekonomicheskaya ochistka poverkhnostnogo stoka v krupnykh gorodakh [The economic treatment of surface runoff in big cities]. *Evrostroyprofi*. 2015. No. 78. Pp. 48–52. (rus)
12. Vaysman Ya.I., Glushankova I.S. *Usloviya obrazovaniya i ochistka filtratsionnykh vod poligonov zakhroneniya TBO: ucheb. posobie* [Treatment and conditions of formation of leachate of municipal solid waste landfills: study guide]. Perm. Perm State Technical University Publishing House. 2003. 167 p. (rus)
13. Vaysman Ya.I., Korotaev V.N., Petrov V.N. et al. *Upravlenie otkhodami. Poligony zakhroneniya TBO: ucheb. Posobie* [Waste management. MSW landfills: study guide]. Perm. Perm State Technical University Publishing House. 2007. 463 p. (rus)
14. *Gosstroy Rossii. Rekomendatsii po raschetu obrazovaniya biogaza i vyboru sistem degazatsii poligonov zakhroneniya tvyrdykh bytovykh otkhodov* [Gosstroy of Russia. Guidelines for the calculation of biogas production and for the choice of degassing systems for municipal solid waste landfills]. Perm. Perm State Technical University Publishing House. 2003. 27 p. (rus)
15. *National Renewable Energy Laboratory. Energy Analysis. Biogas Potential in the United States*. Available at: <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60178.pdf> (Accessed 15.09.2015).
16. Glover B. *Biogas Capture and Utilization: An Effective, Affordable Way to Reduce Greenhouse Gas Emissions and Meet Local Energy Needs*. Available at: [http://www.eesi.org/files/biogas\\_issuebrief\\_061609.pdf](http://www.eesi.org/files/biogas_issuebrief_061609.pdf) (Accessed 15.09.2015).
17. Jaramillo P., Matthews H.S. Landfill-Gas-to-Energy Projects: Analysis of Net Private and Social Benefits. *Environmental science & technology*. 2005. Vol. 39. No. 19. Pp. 7365–7373.
18. Shanjun Li, Han Kyul Yoo, Macauley M. et al. Assessing the role of renewable energy policies in landfill gas to energy projects. *Energy Economics*. 2015. Vol. 49. Pp. 687–697.
19. Fedorov M.P., Zinchenko A.V., Korablev V.V. et al. *Energeticheskoye ispolzovaniye emissii metana na poligone tvyrdykh bytovykh otkhodov Sankt-Peterburga*

Chusov A.N., Maslikov V.I., Molodtsov D.V., Zhazhkov V.V., Riabuokhin O.A. Assessment of zonal distribution of methane on MSW landfills in northern regions for its usage in local power engineering

23. Kröger K. Deponiegas. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dmskroeger.de/Deponieentgasung.pdf> (дата обращения: 15.09.2015).
24. Федоров М.П., Кораблев В.В., Масликов В.И., Иокша Е.О. «Углеродные» инвестиции в энергетическое использование полигонов ТБО. Опыт Санкт-Петербурга по утилизации свалочного биогаза // Экология и жизнь. 2008. №4(77). С. 16–22.
25. Масликов В.И., Чусов А.Н., Негуляева Е.Ю., Черемисин А.В., Молодцов Д.В. Лабораторные исследования разложения отходов в биореакторах для оценки биогазового потенциала и выбора мероприятий по рекультивации полигонов ТБО // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. №2-2(147). С. 229–235.
26. Di Trapani D., Di Bella G., Viviani G. Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: Influence of landfill features and side slopes // *Waste Management*. 2013. Vol. 33. No. 10. Pp. 2108–2115.
27. Rettenberger G. Die Bedeutung der Methan-, Kohlendioxid- und HKW-Emissionen von Deponien für die Atmosphäre. / *Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft*, Bd. 2, Deponiegasnutzung. Economica-Verlag. Bonn. 1991. Pp. 9–25.
28. Chiemchaisri C., Visvanathan C. Greenhouse Gas Emission Potential of the Municipal Solid Waste Disposal Sites in Thailand // *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2008. Vol. 58. Issue 5. Pp. 629–635.
29. Niemczewska J. Metodyka pomiarów emisji gazów ze składowisk odpadów komunalnych // *Nafta-Gaz*. 2013. №8. Pp. 613–618.
30. Biszek M., Pawłowska M., Czerwiński J. Evaluation of measurement methods and estimation of biogas emission from landfills. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2006. №8. Pp. 27–43.
31. Meyvantsdóttir G. Methane emissions from Icelandic landfills. 2014. [Электронный ресурс]. URL: [http://skemman.is/stream/get/1946/18690/44639/1/GudrunMeyvantsdottir\\_MScRitgerd\\_CH4\\_2014.pdf](http://skemman.is/stream/get/1946/18690/44639/1/GudrunMeyvantsdottir_MScRitgerd_CH4_2014.pdf) (дата обращения: 15.05.2015)
32. Johnsson E., Correlation between Methane concentration and emission from old landfills in Sweden. 2010. [Электронный ресурс]. URL: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=1789646&fileId=1789665> (дата обращения: 01.06.2015)
33. Ritzkowski M., Adwiraah H., Wu W., Stegmann R., Characterization of landfills in Central Asia by means of site investigations and landfill simulation in laboratory bioreactors // *Geotechnical Special Publication*. 2008. Issue 177. Pp. 136–143.
34. СНиП 23-01-99\*. Строительная климатология.
35. Чусов А.Н., Масликов В.И., Молодцов Д.В. Исследования состава биогаза на полигоне твердых бытовых отходов // *Безопасность в техносфере*. 2013. № 6 (45). С. 24–28.
36. Bennetts V.H., Lilienthal A.J., Neumann P.P., Trincavelli M. Mobile robots for localizing gas emission sources on landfill sites: is bio-inspiration the way to go? // *Frontiers in Neuroengineering*. 2012. Vol. 4. doi: 10.3389/fneng.2011.00020.
37. Beirne S., Kiernan B.M., Fay C et al. Autonomous greenhouse gas measurement system for analysis of gas migration on landfill sites // 2010 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS) – Proceedings. 2010. Pp. 143–148.
- dlya sokrashcheniya parnikovykh vybrosov i privlecheniya investitsiy v rekultivatsiyu [The energy usage of methane emissions from a municipal solid waste landfill in St. Petersburg to reduce greenhouse gas emissions and attracting investment in recultivation]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2008. No. 6(70). Pp. 135–142. (rus)
20. *Metan so svalok TBO* [Methane from MSW landfills]. The Russian Federal Agency for Science and Innovation. Moscow: RUSDEM. 2009. 80 p. (rus)
21. Maslikov V.I., Chusov A.N., Molodtsov D.V., Ryzhakova M.G. Zonalnoye opredeleniye emissiy biogaza na poligone TBO dlya otsenki geoekologicheskogo sostoyaniya i obosnovaniya upravleniya protsessami razlozheniya otkhodov pri rekultivatsii [The area based determination of biogas emission from MSW landfill for the geocological conditions assessment and substantiation of management of waste decomposition in the process of recultivation]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2012. No. 2-1(147). Pp. 260–265. (rus)
22. Fedorov M.P., Korablev V.V., Maslikov V.I., Ioksha E.O. Audit dlya "uglerodnykh" investitsiy v energeticheskoe ispol'zovanie poligonov tverdykh bytovykh otkhodov [The audit for "carbon" investments in the energy use of municipal solid waste landfills]. St.-Petersburg: St. Petersburg State Polytechnical University Publishing House. 2007. 44 p. (rus)
23. Kröger K. Deponiegas. Available at: <http://www.dmskroeger.de/Deponieentgasung.pdf> (Accessed 15.09.2015).
24. Fedorov M.P., Korablev V.V., Maslikov V.I., Ioksha E.O. "Uglerodnye" investitsii v energeticheskoe ispol'zovanie poligonov TBO ["Carbonic" investments into energy use of MSW landfills]. *Ecology & Life*. 2008. No. 4(77). Pp. 16–22. (rus)
25. Maslikov V.I., Chusov A.N., Negulyaeva E.Yu., Cheremisin A.V., Molodtsov D.V. Laboratornyye issledovaniya razlozheniya otkhodov v bioreaktorakh dlya otsenki biogazovogo potentsiala i vybora meropriyatiy po rekultivatsii poligonov TBO [Laboratory research of waste decomposing in bioreactors for assessment of biogas potential and choice of measures for aftercare phase]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2012. No. 2-2(147). Pp. 229–235. (rus)
26. Di Trapani D., Di Bella G., Viviani G. Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: Influence of landfill features and side slopes. *Waste Management*. 2013. Vol. 33. No. 10. Pp. 2108–2115.
27. Rettenberger G. Die Bedeutung der Methan-, Kohlendioxid- und HKW-Emissionen von Deponien für die Atmosphäre. *Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft*, Bd. 2. Deponiegasnutzung, Economica-Verlag. Bonn. 1991. Pp. 9–25.
28. Chiemchaisri C., Visvanathan C. Greenhouse Gas Emission Potential of the Municipal Solid Waste Disposal Sites in Thailand. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2008. Vol. 58, Issue 5. Pp. 629–635.
29. Niemczewska J. Metodyka pomiarów emisji gazów ze składowisk odpadów komunalnych. *Nafta-Gaz*. 2013. No. 8. Pp. 613–618.
30. Biszek M., Pawłowska M., Czerwiński J. Evaluation of measurement methods and estimation of biogas emission from landfills. *Rocznik Ochrona Środowisk*. 2006. No. 8. Pp. 27–43.
31. Meyvantsdóttir G. *Methane emissions from Icelandic landfills*. 2014. Available at: [http://skemman.is/stream/get/1946/18690/44639/1/GudrunMeyvantsdottir\\_MScRitgerd\\_CH4\\_2014.pdf](http://skemman.is/stream/get/1946/18690/44639/1/GudrunMeyvantsdottir_MScRitgerd_CH4_2014.pdf) (Accessed 15.05.2015).
32. Johnsson E. *Correlation between Methane concentration and emission from old landfills in Sweden*. 2010. Available at: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&>

Чусов А.Н., Масликов В.И., Молодцов Д.В., Жажков В.В., Рябухин О.А. Оценка зонального распределения метана на полигонах ТБО северных регионов для его использования местной энергетикой

recordId=1789646&fileId=1789665 (Accessed 01.06.2015).

33. Ritzkowski M., Adwiraah H., Wu W., Stegmann R. Characterization of landfills in Central Asia by means of site investigations and landfill simulation in laboratory bioreactors. *Geotechnical Special Publication*. 2008. Issue 177. Pp. 136–143.
34. SNiP 23-01-99\*. Stroitel'naya klimatologiya [RUssian Building Codes 23-01-99\*. Construction climatology]. (rus)
35. Chusov A.N., Maslikov V.I., Molodtsov D.V. Researches of Biogas Composition on Landfill. *Safety in Technosphere*. 2013. No. 6(45). Pp. 24–28. (rus)
36. Bennetts V.H., Lilienthal A.J., Neumann P.P., Trincavelli M. Mobile robots for localizing gas emission sources on landfill sites: is bio-inspiration the way to go? *Frontiers in Neuroengineering*. 2012. Vol. 4. doi: 10.3389/fneng.2011.00020.
37. Beirne S., Kiernan B.M., Fay C et al. Autonomous greenhouse gas measurement system for analysis of gas migration on landfill sites. *2010 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS) – Proceedings*. 2010. Pp. 143–148.

Александр Николаевич Чусов,  
+78122975928; эл. почта: chusov17@mail.ru

Alexander Chusov,  
+78122975928; chusov17@mail.ru

Владимир Иванович Масликов,  
+78122975928; эл. почта: vmaslikov@list.ru

Vladimir Maslikov,  
+78122975928; vmaslikov@list.ru

Дмитрий Владиславович Молодцов,  
+79052152066; эл. почта: kovu@bigcats.ru

Dmitry Molodtsov,  
+79052152066; kovu@bigcats.ru

Вячеслав Владимирович Жажков,  
+79117419141; эл. почта: zhazhkov@gmail.com

Viacheslav Zhazhkov,  
+79117419141; zhazhkov@gmail.com

Олег Алимович Рябухин,  
+79602363774; эл. почта:  
pulya\_007@hotmail.com

Oleg Riabuokhin,  
+79602363774; pulya\_007@hotmail.com

© Чусов А.Н., Масликов В.И., Молодцов Д.В., Жажков В.В., Рябухин О.А., 2015