



Малышева А.Г., Стародубова Н.Ю.

Гигиенические аспекты обеспечения химической безопасности применения новых здоровьесберегающих технологий утилизации биогаза на полигонах твёрдых бытовых отходов

ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью»
Федерального медико-биологического агентства, 119121, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Оздоровление окружающей среды — одна из важнейших задач в крупных административных и промышленных центрах. Создание комфортных условий жизнедеятельности человека экологически безопасными методами относится к актуальным направлениям гигиены окружающей среды.

Материалы и методы. Оценка эффективности и химической безопасности применения новой технологии сбора, очистки, обезвреживания и утилизации свалочного газа на полигоне твёрдых коммунальных отходов выполнена путём определения органических веществ хромато-масс-спектрометрическим методом, позволяющим идентифицировать и количественно определять с чувствительностью на уровне и ниже гигиенических нормативов широкий спектр органических соединений C_5-C_{20} в воздухе с неизвестным составом загрязняющих веществ.

Результаты. В результате применения новой системы очистки свалочного газа на полигоне твёрдых бытовых отходов уменьшилась суммарная концентрация загрязняющих веществ, в том числе предельных и ароматических углеводородов, кислородсодержащих соединений (спиртов, карбоновых кислот), органических серосодержащих соединений, диоксида серы. Новая технология очистки свалочного газа позволила достичь стопроцентного удаления из воздуха обладающих запахом диалкилсульфидов и азотсодержащих соединений. Однако на выходе из системы идентифицированы не обнаруженные на входе соединения, которые можно рассматривать как продукты сжигания и трансформации углеводородов, входящих в состав свалочного газа. Их присутствие свидетельствует об окислительном процессе при утилизации.

Ограничения исследования. Исследование ограничено применением метода определения органических соединений с молекулярной формулой C_5-C_{20} .

Заключение. Для адекватной оценки качества и химической безопасности применения новой технологии сбора, очистки, обезвреживания и утилизации свалочного газа необходимо применять физико-химические методы исследований. Это позволит идентифицировать и количественно определять одновременно десятки загрязняющих веществ, учитывать многокомпонентность химического состава и возможность образования токсичных продуктов трансформации, воздействующих на человека в реальных условиях.

Ключевые слова: физико-химические исследования; объекты окружающей среды; полигоны твёрдых бытовых отходов; утилизация биогаза; химико-аналитический контроль; технологии здоровьесбережения; оздоровительные мероприятия; процессы трансформации

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требовало заключения локального этического комитета.

Для цитирования: Малышева А.Г., Стародубова Н.Ю. Гигиенические аспекты обеспечения химической безопасности применения новых здоровьесберегающих технологий утилизации биогаза на полигонах твёрдых бытовых отходов. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(10): 1118–1126. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-10-1118-1126> <https://elibrary.ru/iodyxc>

Для корреспонденции: Малышева Алла Георгиевна, e-mail: AMalysheva@cspmrz.ru

Участие авторов: Малышева А.Г. — концепция и дизайн исследования, написание текста, сбор материала и обработка данных, редактирование; Стародубова Н.Ю. — обработка данных, редактирование текста. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 05.07.2024 / Поступила после доработки: 08.08.2024 / Принята к печати: 02.10.2024 / Опубликовано: 19.11.2024

Alla G. Malysheva, Natalya Yu. Starodubova

Hygienic aspects of ensuring chemical safety of using new health-saving technologies for the utilization of biogas at solid municipal waste landfills

Centre for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Environmental health issues are currently among the most important for the population of large administrative and industrial centers. Improving the quality of the environment and creating comfortable living conditions for humans using environmentally friendly methods is one of the current topical areas in environmental hygiene.

Materials and methods. The assessment of the effectiveness and chemical safety of the application of a new technology for the collection, purification, neutralization, and disposal of landfill gas for the content of a wide range of organic compounds C_5-C_{20} at a municipal solid waste landfill was carried out using a chromato-mass spectrometric method that allows identifying and quantifying with sensitivity at and below hygienic standards a wide range of organic compounds C_5-C_{20} in air with an unknown composition of pollutants.

Results. As a result of the operation of the new landfill gas purification system at the solid waste landfill, the total concentration of pollutants, including marginal and aromatic hydrocarbons, oxygen-containing compounds (alcohols, carboxylic acids), organic sulfur-containing compounds, and sulfur dioxide decreased. As a result of the operation of the new landfill gas purification technology, 100% purification from odorous dialkyl sulfides and nitrogen-containing compounds has been achieved. However, at the outlet of the system, compounds not detected at the inlet were identified, which can be considered as products of combustion and transformation of hydrocarbons that are part of landfill gas, the presence of which indicates the use of an oxidative process in the process of its disposal.

Limitations. The study is limited to the application of the method of investigation of organic compounds with the molecular formula C_5-C_{20} .

Conclusion. For an adequate assessment of the quality and chemical safety to human health of health-saving technologies, an important condition is the use of physical-chemical studies that identify and quantify dozens of pollutants simultaneously, which makes it possible to take into account the multiple componentness of the chemical composition and the possibility of adverse side effects in the form of toxic transformation of products affecting humans in real environmental pollution conditions.

Keywords: physical-chemical research; environmental facilities; landfills of solid household waste; biogas utilization; chemical and analytical control; health-saving technologies; wellness measures; transformation processes

Compliance with ethical standards. This study does not require local ethics committee approval.

For citation: Malysheva A.G., Starodubova N.Yu. Hygienic aspects of ensuring chemical safety of using new health-saving technologies for the utilization of biogas at solid municipal waste landfills. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2024; 103(10) 1118–1126. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-10-1118-1126> <https://elibrary.ru/iodyxc> (In Russ.)

For correspondence: Alla G. Malysheva, e-mail: AMalysheva@cspmrz.ru

Contribution: Malysheva A.G. — concept and design of research, text writing, material collection and data processing, editing; Starodubova N.Yu. — data processing, text editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: July 5, 2024 / Revised: August 8, 2024 / Accepted: October 2, 2024 / Published: November 19, 2024

Введение

Оздоровление окружающей среды — одна из важнейших задач в крупных административных и промышленных центрах. Создание комфортных условий жизнедеятельности человека экологически безопасными методами относится к актуальным направлениям гигиены окружающей среды.

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» от 28.02.2024 г. № 145 в ближайшее десятилетие приоритетами научно-технологического развития следует считать направления, позволяющие получить значимые научные и научно-технические результаты, создать отечественные наукоёмкие технологии, обеспечивающие переход к технологиям здоровьесбережения.

Информация о состоянии окружающей среды в части её химической безопасности не всегда соответствует реальной степени загрязнения, а гигиеническая оценка зачастую не показывает наличия всех поллютантов. В нашей стране система государственного химико-аналитического мониторинга качества и безопасности среды ориентирована на ограниченное количество показателей, не учитывает процессов трансформации веществ под влиянием природных и техногенных факторов. Необходимо учитывать опасность присутствия ненормированных и не идентифицированных веществ, влияние которых на здоровье населения не контролируется [1].

В наиболее населённых промышленных регионах Российской Федерации окружающая среда испытывает на себе воздействие многокомпонентных загрязнений. Токсичные, опасные и канцерогенные вещества загрязняют атмосферный воздух, водные объекты, почву, воздушную среду закрытых помещений. В исследованиях возможного влияния новых технологий на окружающую среду и здоровье населения часто не учитывают многокомпонентного химического состава загрязнений [2]. Применение технологий здоровьесбережения, проведение природоохранных и оздоровительных мероприятий также могут вызывать ухудшение химического состава воздуха или водного объекта, подвергающегося при использовании данной технологии физико-химическому воздействию в результате процессов нагревания, сжигания, хлорирования, озонирования, УФ-облучения и др. В России ежегодно образуется порядка 3,5 млрд тонн твёрдых коммунальных отходов (ТКО). Из них до трёх млрд тонн вывозят в места захоронения, на которых уже депонировано более 85 млрд тонн отходов. Таким образом, прирост захоронения ТКО ежегодно составляет 3–4%. В настоящее время территории заполненных свалок и полигонов занимают площадь более 50 тыс. га, а средний удельный выход биогازа достигает 120–400 м³/т ТКО. Согласно подсчётам, потенциал генерации биогازа составляет сотни миллиардов кубических метров

в год [3–6]. Полигоны и свалки ТБО оказывают негативное воздействие на окружающую среду и человека [7–10]. Создание, эксплуатация и закрытие полигонов требуют решения ряда экологических задач. Для этого предлагаются различные защитные мероприятия и новые технологии здоровьесбережения на территориях размещения полигонов. Так, недавно власти Подмоскovie опубликовали территориальную схему обращения с отходами до 2030 г., согласно которой отдельные мусорные полигоны в Подмоскovie будут закрыты, а оставшиеся начнут принимать больше мусора. При этом мощность некоторых свалок будет увеличена от двух до 16 раз. По Подмоскovie и в Новой Москве прошли митинги против мусорных полигонов и строительства мусоросжигательных заводов. В частности, жители Волоколамска, Балашихи, Троицка, Клина, Сергиева Посада, Наро-Фоминска и Коломны требовали закрытия мусорных полигонов. Некоторые мусорные свалки действительно были закрыты. Например, в первом полугодии 2016 г. прекратил приём отходов полигон «Солопово». С того же времени не работают полигоны «Часы», «Аннино», «Сьяново-1». В 2017 г. были закрыты полигоны «Кучино», «Каурцево», «Кулаковский» и «Царево». Несмотря на то что некоторые полигоны были закрыты, мусора меньше не стало: просто выросла нагрузка на другие [11]. Многие полигоны не только продолжают работу, но и серьёзно увеличились в размерах. Власти планируют присоединить к ним дополнительные территории, а вблизи разместить мусороперерабатывающие и мусоросжигательные заводы. Например, уже выросла способность приёма мусора свалки «Непейно», которая находится рядом с Сергиевым Посадом. Если в 2016 г. на полигон свозили 130 тыс. тонн отходов в год, то к настоящему времени он принимает 260 тыс. тонн, то есть в два раза больше. Полигон «Егорьевский» в 2016 г. принимал всего 25 тыс. тонн отходов, в настоящее время туда свозят уже более 50 тыс. тонн. Мощность полигона «Тимохово» выросла с 1150 тыс. тонн до 1500. Если часть свалок планируют закрыть, то этот полигон продолжит свою работу до 2030 г. и будет принимать ещё больше мусора (1500 тыс. тонн в год). После закрытия полигона «Кучино» нагрузка на «Ядрово» в Волоколамске возросла, туда стали свозить мусор 13 районов Подмоскovie. Всё это привело к тому, что в городе был введён режим чрезвычайного положения: жители стали массово обращаться в больницы из-за плохого самочувствия. В настоящее время «Ядрово» принимает 420 тыс. тонн отходов в год, но уже в следующем году полигон ждёт модернизация, после которой его мощность увеличится до 600 тыс. тонн в год, то есть в 1,5 раза [12–15].

Вблизи всех полигонов, которые будут расширены, планируется строительство мусороперерабатывающих заводов, поскольку в Подмоскovie вводится двухконтейнерная система сбора мусора. В первый контейнер люди должны

выбрасывать так называемый мокрый мусор (пищевые и растительные отходы), а во второй контейнер — сухой мусор. Это пластик, стекло, металл и бумага. После попадания в «сухой» контейнер этот мусор будет рассортирован и переработан, тогда как «мокрый» мусор сразу будет захоронен и обезврежен. На полигонах запланировано построить новые мусоросжигательные заводы, поскольку лишь переработки недостаточно. Считается, что термическое обезвреживание твёрдых коммунальных отходов при высокой температуре обеспечивает лучший экологический эффект, чем размещение отходов на полигонах. При термическом обезвреживании отходов на современном заводе выбросы вредных веществ в воздух соответствуют уровню обычных тепловых станций, производящих электрическую энергию. После термического обезвреживания остаётся минимальное количество отходов, требующих захоронения, что позволяет в дальнейшем отказаться от строительства новых полигонов [16–21].

Полигон ТКО можно сравнить с биохимическим реактором, в котором в процессе эксплуатации, а также в течение нескольких десятилетий после его закрытия в результате анаэробного разложения отходов растительного и животного происхождения образуется биогаз — свалочный газ (СГ). Макрокомпонентами свалочного газа являются метан (CH_4) и диоксид углерода (CO_2), их доля может составлять от 40–70 до 30–60% соответственно. В существенно меньших концентрациях присутствуют азот (N_2), кислород (O_2), водород (H_2). В качестве микропримесей в состав свалочного газа могут входить десятки различных органических соединений. В определённых концентрациях свалочный газ токсичен. Показатели токсичности определяются наличием ряда микропримесей, например, сероводорода (H_2S), придающего свалочному газу резкий неприятный запах. Теплота сгорания свалочного газа составляет от 21 до 27,2 МДж/м³. По теплоте сгорания 1 м³ биогаза эквивалентен 0,8 м³ природного газа, 0,7 кг мазута, 1,5 кг дров [23, 24].

Технология сбора, обезвреживания и утилизации свалочного газа на полигоне ТКО в Балашихе Московской области основана на сборе свалочного газа из газовых скважин, его транспортировке по трубопроводам, сжигании на факельной установке и утилизации в качестве высококалорийного топлива на блочной теплоэлектростанции.

Материалы и методы

Методом хромато-масс-спектрометрии для оценки эффективности и химической безопасности новой технологии сбора, очистки (обезвреживания) и утилизации СГ проведены исследования на содержание широкого спектра органических соединений C_5 – C_{20} на полигоне коммунальных отходов (ТКО) «Кучино» (Балашиха, Московская область).

Исследования, ориентированные на идентификацию и количественное определение органических веществ, выполнены хромато-масс-спектрометрическим методом, позволяющим идентифицировать и количественно определять с чувствительностью на уровне и ниже гигиенических нормативов широкий спектр органических веществ C_5 – C_{20} в атмосферном воздухе с неизвестным составом загрязняющих веществ.

Химические анализы проведены с использованием метрологически аттестованного оборудования: хромато-масс-спектрометрической системы Thermo Fisher Scientific, включающей газовый хроматограф Focus GC с полным электронным контролем газовых потоков и режимом цифрового контроля давления и потоков с автоматическим определением параметров колонки, масс-спектрометрического детектора DSQ II с квадрупольным масс-анализатором, обеспечивающим измерения в диапазоне массовых чисел от 1 до 1050, термодесорбера 9300 АСЕМ с криофокусированием газовой пробы в соответствии с методическим

документом¹. Система имеет программное обеспечение, контролирующее работу всего прибора, то есть процессы сбора, хранения всех масс-спектров в процессе хромато-масс-спектрометрического анализа, обработки результатов измерений, количественного анализа, поиска и сравнения с библиотекой масс-спектров NIST 08, включающей более 220 тыс. спектров для более 190 тыс. соединений с их химическими структурами [22].

Пробы свалочного газа отбирали в трубки, заполненные сорбентом Тенах ТА, с использованием четырёхканального электрического аспирационного устройства ПУ-4Э. Отбор проводили на входе в трубопровод при температуре плюс 30 °С и на выходе из системы очистки (обезвреживания) при температуре плюс 18 °С. Объём газовой пробы составил 4,2 дм³ при скорости аспирации 0,3 дм³/мин. Пробы отбирали в соответствии с Руководящим документом².

Хромато-масс-спектрометрический анализ выполнен при следующих условиях.

Термодесорбция. Температура восьмидюймового клапана плюс 150 °С, интерфейса — плюс 200 °С, фокусирующей трубки — плюс 200 °С (время её нагрева — 2 мин); при температуре отдувки сорбционной трубки плюс 280 °С, сорбционной трубки — плюс 280 °С (время её нагрева — 5 мин). Охлаждение в течение 2 мин с температурой криофокусировки плюс 10 °С и объёмной скоростью гелия через сорбционную трубку 20 см³/мин.

Газохроматографическое разделение проведено на хроматографической капиллярной колонке из кварцевого стекла DB-5 внутренним диаметром 0,32 мм и длиной 60 м с неподвижной метилсилоксановой фазой (5%-й фенилметилполисилоксан), толщина плёнки 1 мкм с начальной температурой термостата колонки плюс 33 °С; временное плато начальной температуры термостата колонки составило 3 мин, скорость подъёма температуры термостата колонки — 6 °/мин.; промежуточная температура термостата колонки — плюс 60 °С; временное плато промежуточной температуры термостата колонки 0 мин; скорость подъёма температуры термостата колонки 6,5 °/мин; конечная температура термостата колонки плюс 250 °С; временное плато конечной температуры термостата колонки 3 мин; объёмная скорость гелия через колонку 1,5 см³/мин.

Масс-селективное детектирование проведено при температуре ионного источника плюс 200 °С; ток детектора составил 300 000 пА. Режим сканирования: время до начала сканирования — 4,3 мин; диапазон сканирования — 41–260 м/z (соотношение массы к заряду); время анализа — 41 мин.

Результаты

В таблице приведены результаты определения средних из пяти концентраций обнаруженных органических веществ в свалочном газе на входе и выходе из системы утилизации другого полигона твёрдых бытовых отходов Московской области. Кроме того, для сравнения приведены гигиенические нормативы обнаруженных на выходе из системы очистки веществ в атмосферном воздухе (ПДК_{м.р.} и ОБУВ) и воздухе рабочей зоны (ПДК_{р.з.}) в соответствии с СанПиН 1.2.3685–21³.

¹ ГОСТ Р ИСО 16000–6–2007. Воздух замкнутых помещений. Часть 6. Определение летучих органических соединений в воздухе замкнутых помещений и испытательной камеры путём активного отбора проб на сорбент Тенах ТА с последующей термической десорбцией.

² РД 52.04.186–89 «Руководство по контролю загрязнения атмосферы».

³ СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2 (ред. от 30.12.2022 г.).

Соединения, идентифицированные в выбросах до и после использования технологии утилизации свалочного газа на полигоне твёрдых коммунальных отходов

Compounds identified in emissions before and after the use of landfill gas disposal technology at a municipal solid waste landfill

№ No.	Органическое соединение An organic compound	Концентрация, мг/м³ Concentration, mg/m³		Гигиенический норматив, мг/м³ Hygienic standard, mg/m³		
		Свалочный газ (вход в систему утилизации) Landfill gas (input to the recycling system)	Газ в факельном выбросе (выход из системы утилизации) Gas in the flare discharge (exit from the recycling system)	ПДК _{м.р.} MPC _{m.r.}	ОБУВ ASI	ПДК _{г.з.} MPC _{t.z.}
Углеводороды, в том числе: / Hydrocarbons, including:		3.350	0.546	—	—	—
предельные / limit values		0.762	0.298	—	—	—
1	Гексан и изомеры / Hexane and isomers	0.094	0.060	60	—	ΣC ₁ –C ₁₀ = 300
2	Гептан и изомеры / Heptane and isomers	0.460	0.180	—	1.5	ΣC ₁ –C ₁₀ = 300
3	Октан и изомеры / Octane and isomers	0.208	0.058	НУ	НУ	ΣC ₁ –C ₁₀ = 300
непредельные / unsaturated		0.544	0.102	—	—	—
4	Бутен / Buten	0.024	0.020	3	—	НУ
5	Пентен / Penten	0.026	—	НУ	НУ	НУ
6	Гексен / Hexene	0.102	—	НУ	НУ	НУ
7	Гептен / Heptene	0.010	0.046	НУ	НУ	НУ
8	Октен и изомеры / Octene and isomers	0.196	0.014	НУ	НУ	НУ
9	Нонен и изомеры / Nonene and isomers	0.014	0.006	НУ	НУ	НУ
10	Пентадиены / Pentadiens	0.162	0.016	0.5	—	НУ
11	2,4-гексадиен / 2,4-Hexadiene	0.010	—	НУ	НУ	НУ
циклические неароматические (нафthenовые) Cyclic non-aromatic (naphthenic)		0,450	0.088	—	—	—
12	Диметилциклопропан / Dimethylcyclopropane	0.070	—	НУ	НУ	НУ
13	Циклопропилбутан / Cyclopropylbutane	—	0.002	НУ	НУ	НУ
14	Метилциклопентан / Methylcyclopentane	—	0.004	НУ	НУ	НУ
15	Циклогексан / Cyclohexane	—	0.004	1.4	—	НУ
16	Диметилциклопентан / Dimethylcyclopentane	0.162	—	НУ	НУ	НУ
17	Метилциклогексан / Methylcyclohexane	0.096	0.040	НУ	НУ	50
18	Триметилциклопентан / Trimethylcyclopentane	—	0.002	НУ	НУ	НУ
19	Диэтилциклогексан / Diethylcyclohexane	—	0.002	НУ	НУ	НУ
20	Циклогептан / Cycloheptane	—	0.028	НУ	НУ	НУ
21	Циклооктан / Cyclooctan	—	0.002	НУ	НУ	НУ
22	Циклодекан / Cyclodecane	—	0.004	НУ	НУ	НУ
23	Циклопентены / Cyclopentenenes	0.062	—	НУ	НУ	НУ
24	Метилциклопентадиен / Methylcyclopentadiene	0.060	—	НУ	НУ	НУ
терпеновые / Terpene		0.004	0.012	—	—	—
25	α-пинен / α-Pinene	0.004	0.012	НУ	НУ	НУ
ароматические / Aromatic		1.590	0.046	—	—	—
26	Бензол / Benzene	1.490	0.024	0.3	—	5
27	Толуол / Toluene	0.074	0.014	0.6	—	50
28	Этилбензол / Ethylbenzene	0.004	0.002	0.02	—	50
29	м, п-ксилолы / m, p-Xylenes	0.008	0.002	0.04	—	НУ
30	о-ксилол / o-Xylene	0.004	0.002	0.3	—	НУ
31	Стирол / Styrene	0.008	0.002	0.04	—	10
32	Метилстирол / Methyl Styrene	0.002	—	0.04	—	НУ

Продолжение Таблицы на стр. 1122–1123. / Continuation of the Table on pages 1122–1123.

Продолжение Таблицы. Начало на стр. 1121. / Continuation of the Table. The beginning is on page 1121.

№ No.	Органическое соединение An organic compound	Концентрация, мг/м³ Concentration, mg/m³		Гигиенический норматив, мг/м³ Hygienic standard, mg/m³		
		Свалочный газ (вход в систему утилизации) Landfill gas (input to the recycling system)	Газ в факельном выбросе (выход из системы утилизации) Gas in the flare discharge (exit from the recycling system)	ПДКм.р. MPCm.r.	ОБУВ ASI	ПДКр.з. MPCr.z.
	Кислородсодержащие соединения, в том числе: Oxygen-containing compounds, including:	0.846	0.364	—	—	—
	спирты / Alcohols	0.150	0.112	—	—	—
33	Этанол / Ethanol	—	0.018	5	—	НУ
34	Изопропанол / Isopropanol	—	0.032	0.3	—	10
35	трет-бутанол / tert-Butanol	—	0.016	0.6	—	НУ
36	Изобутанол / Isobutanol	—	0.036	0.6	—	10
37	1-бутанол / 1-Butanol	0.016	0.008	0.10	—	10
38	2-метил-1-бутанол / 2-Methyl-1-butanol	0.128	—	НУ	НУ	НУ
39	Диметилбензиловый спирт / Dimethylbenzyl alcohol	0.006	0.002	НУ	НУ	НУ
	альдегиды / Aldehydes	0.160	0.104	—	—	—
40	2-метилпропаналь / 2-Methylpropanal	0.042	0.024	0.01	—	НУ
41	Бутаналь / Butanal	—	0.016	0.015	—	НУ
42	3-метилбутаналь / 3-Methylbutanal	0.012	—	—	0.03	НУ
43	Гексаналь / Hexanal	0.056	0.026	0.02	—	НУ
44	Октаналь / Octanal	—	0.006	0.02	—	НУ
45	Нонаналь / Nonanal	0.004	0.004	0.02	—	НУ
46	Деканаль / Decanal	0.002	—	0.02	—	НУ
47	Додеканаль / Dodecanal	—	0.002	НУ	НУ	НУ
48	Акролеин / Acrolein	0.038	0.006	0.03	—	0.2
49	Бензальдегид / Benzaldehyde	0.006	0.020	0.04	—	НУ
	кетоны / Ketones	0.188	0.084	—	—	—
50	Ацетон / Acetone	0.098	0.054	0.35	—	200
51	2-бутанон / 2-Butanone	—	0.016	—	0.1	200
52	Метилвинилкетон / Methylvinyl Ketone	0.084	0.010	0.006	—	0.1
53	Ацетофенон / Acetophenone	0.006	0.002	0.010	—	5
54	Ванилин / Vanillin	—	0.002	НУ	НУ	НУ
	карбоновые кислоты / Carboxylic acids	0.178	0.028	—	—	—
55	Уксусная / Acetic acid	0.172	—	0.2	—	НУ
56	Гексановая / Hexanoic	—	0.008	0.01	—	5
57	Гептановая / Heptanoic	—	0.002	НУ	НУ	НУ
58	Октановая / Octanoic	—	0.006	НУ	НУ	НУ
59	Нонановая / Nonanoic	—	0.010	НУ	НУ	НУ
60	Бензойная / Benzoic	0.006	—	—	0.03	5
61	Фталевая / Phthalic acid	—	0.002	НУ	НУ	НУ
	простые эфиры / Ether	0.032	0.024	—	—	—
62	Диэтиловый эфир / Diethyl ether	0.032	0.024	1	—	НУ
	сложные эфиры / Complex ether	0,026	—	—	—	—
63	Моноацетат этиленгликоля / Ethylene Glycol monoacetate	0.026	—	НУ	НУ	НУ

Окончание Таблицы на стр. 1123. / The end of the Table is on page 1123.

Продолжение Таблицы. Начало на стр. 1121. / Continuation of the Table. The beginning is on page 1121.

№ No.	Органическое соединение An organic compound	Концентрация, мг/м³ Concentration, mg/m³		Гигиенический норматив, мг/м³ Hygienic standard, mg/m³		
		Свалочный газ (вход в систему утилизации)	Газ в факельном выбросе (выход из системы утилизации)	ПДКм.р. MPCm.r.	ОБУВ ASI	ПДКр.з. MPCr.z.
		Landfill gas (input to the recycling system)	Gas in the flare discharge (exit from the recycling system)			
Другие кислородсодержащие / Other oxygen-containing		0.112	0.012	—	—	—
64	Метилфураны / Methylfurans	0.100	0.006	НУ	НУ	1
65	Дигидрофуран / Dihydrofuran	0.010	0.006	НУ	НУ	НУ
66	Тетрагидродиметилбен-зофуран (ментофуран) Tetrahydrodimethylbene-zofuran (mentofuran)	0.002	—	НУ	НУ	НУ
Серосодержащие соединения / Sulfur-containing compounds		0.038	0.006	—	—	—
67	Сероуглерод / Carbon disulfide	0.026	0.004	0.03	—	НУ
68	Диметилдисульфид / Dimethyl disulfide	0.002	0.002	0.7	—	НУ
69	Метил, н-бутилдисульфид / Methyl, n-butyl disulfide	0.004	—	НУ	НУ	НУ
70	Пропил-н-бутилдисульфид / Propyl-n-butyl disulfide	0.002	—	НУ	НУ	НУ
71	Пропил-втор-бутилдисульфид / Propyl-second-butyl disulfide	0.002	—	НУ	НУ	НУ
72	Бис(втор-бутил)дисульфид / Bis(second-butyl)disulfide	0.002	—	НУ	НУ	НУ
Хлорсодержащие соединения / Chlorine-containing compounds		0.024	0.030	—	—	—
73	Хлороформ / Chloroform	0.016	0.006	0.1	—	5
74	Тетрахлорметан / Carbon tetrachloride	0.008	0.022	4	—	10
75	Тетрахлорэтилен / Tetrachloroethylene	—	0.002	0.5	—	10
Азотсодержащие вещества / Nitrogen-containing substances		0.034	—	—	—	—
76	Ацетонитрил / Acetonitrile	0.016	—	—	0.1	0.1
77	Пропионитрил / Propionitrile	0.004	—	НУ	НУ	—
78	Нитрозометан / Nitrosomethane (CH ₃ NO)	0.004	—	НУ	НУ	—
79	Метилпиразин / Methylpyrazine (C ₅ H ₆ N ₂)	0.010	—	НУ	НУ	—
Другие соединения / Other compounds		0.158	0.038	—	—	—
80	Диоксид серы* / Sulfur dioxide*	0.158	0.038	0,5	—	10
Всего соединений / Total compounds		57	57	—	—	—
Суммарная концентрация загрязняющих соединений, мг/м³ Total concentration of polluting compounds, mg/m³		4.450	0.984	—	—	—

Примечание. НУ — гигиенический норматив не установлен; * — концентрация оценочная.
Note: НУ — the hygienic standard has not been installed; * — estimated concentration.

Обсуждение

Примером недоучёта многокомпонентности химического состава выбросов и протекающих процессов трансформации являются исследования химической безопасности применения технологии очистки выбросов табачной фабрики [1]. Так, хромато-масс-спектрометрический анализ выбросов табачной фабрики в атмосферный воздух выявил присутствие примерно 50 органических веществ. В значительных концентрациях присутствовали азотсодержащие вещества, фурановые соединения и сам фуран, производные пиридина, пиррола, пиразина и никотина. Более 90% идентифицированных веществ не имели гигиенических нормативов. Проведённый анализ химического состава выбросов до и после очистки показал снижение концентрации загрязняющих веществ и сокращение их перечня. Содержание никотина снизилось почти в 70 раз, а количество веществ после очистки уменьшилось в три раза. Тем не менее обнаружены восемь новых веществ, в том числе азотсодержащих, отно-

сящихся к группе токсичных и опасных соединений. Эти вещества не контролировали, а их влияние на здоровье населения осталось неучтённым.

Эффективность и химическая безопасность применения новой технологии очистки и обезвреживания свалочного газа ранее была изучена на примере одного из полигонов Московской области [22]. Установлено снижение суммарной концентрация загрязняющих соединений, содержания углеводородов, в том числе предельных, ароматических, кислород- и серосодержащих соединений, спиртов (от 63 до 2200 раз) в результате работы системы переработки свалочного газа. При этом достигнута стопроцентная очистка от обладающих запахом меркаптанов, сульфидов, ди- и трисульфидов, нафтенных и терпеновых углеводородов и хлорсодержащих соединений. Количество загрязняющих соединений уменьшилось более чем в два раза, однако на выходе из системы очистки идентифицированы не обнаруженные на входе соединения, которые можно рассматривать как продукты трансформации при сжигании углеводородов.

Так, идентифицированы серо- и хлорсодержащее соединение (метилсульфохлорид), стирол, 1-бутанол, фенол, альдегиды (гексанааль, нонаналь, безальдегид, бензацетальдегид), ацетофенон и карбоновые кислоты (уксусная, пропионовая, бутановая, гексановая, октановая, бензойная), фталевый ангидрид, диизобутилфталат, диоксан, 4-метил-2,3-дигидропиран и азотсодержащие соединения (ацетонитрил и оксим бензальдегида). Хромато-масс-спектрометрические исследования, ориентированные на распознавание компонентов воздушных выбросов с количественной оценкой до и после системы очистки свалочного газа, позволили проводить мониторинг выбросов с учётом реального содержания и изменения группового и компонентного состава под влиянием химического воздействия новой технологии.

Из приведённой таблицы видно, что химико-аналитическим методом идентифицировано в свалочном газе более 80 органических соединений и одно неорганическое (диоксид серы). Так, на входе в систему утилизации свалочного газа идентифицировано 57 органических соединений, принадлежащих к различным классам органических веществ. Это углеводороды, в том числе предельные, непредельные, циклические неароматические (нафтеновые), ароматические, терпеновые и кислородсодержащие соединения (спирты, альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты, простые и сложные эфиры), а также серо-, хлор- и азотсодержащие соединения. Суммарное содержание обнаруженных веществ составило 4,45 мг/м³. Основная часть в составе свалочного газа принадлежала углеводородам (75%), кислородсодержащим соединениям (19%). Серосодержащие соединения составили 0,9%, азотсодержащие — 0,8%, хлорсодержащие — 0,5%. Углеводородный состав представлен предельными (17,1%), непредельными (12,2%), нафтеновыми (10,1%), ароматическими углеводородами (35,7%). Кислородсодержащие соединения представлены в основном кетонами (4,2%) и карбоновыми кислотами (преимущественно уксусной) (4%). Серосодержащие соединения были представлены дисульфидами. Идентифицировано два хлорсодержащих соединения, концентрации которых были незначительны, и четыре азотсодержащих соединения, вклад которых в суммарное содержание идентифицированных веществ составил 0,8%. На входе в систему утилизации идентифицирован диоксид серы (SO₂), вклад которого в суммарное содержание веществ составил 3,6%.

В то же время на выходе из системы утилизации (обезвреживания) свалочного газа идентифицировано также 57 органических соединений, суммарное содержание которых составило 0,984 мг/м³. Состав биогаза на выходе из системы представлен углеводородами (55,5%), кислородсодержащими соединениями (37%), серо- и хлорсодержащими соединениями — 0,6 и 3% соответственно.

Установлено, что в результате работы системы очистки свалочного газа уменьшилась суммарная концентрация заг-

рязняющих соединений в 4,5 раза, при этом содержание углеводородов — в 6,1 раза, предельных углеводородов — в 2,6 раза, ароматических углеводородов — в 34,6 раза, кислородсодержащих соединений — в 2,3 раза, спиртов — в 1,3 раза, карбоновых кислот — в 6,4 раза, органических серосодержащих соединений — в 6,3 раза, диоксида серы — в 4,2 раза. В результате применения новой технологии очистки свалочного газа удалось достигнуть стопроцентной очистки от обладающих запахом диалкилсульфидов (исключение — диметилдисульфид) и азотсодержащих соединений. При этом количество идентифицированных веществ не изменилось.

Важно, что на выходе из системы очистки были идентифицированы не обнаруженные на входе соединения, которые можно рассматривать как продукты сжигания и трансформации углеводородов свалочного газа. В его состав, по данным литературы, могут входить предельные углеводороды (метан, этан, пропан, бутан), которые невозможно определить используемым методом. Так, на выходе из системы не обнаружена уксусная кислота, вклад которой в газ на входе составлял 3,9%, однако идентифицированы не обнаруженные в биогазе на входе кислородсодержащие продукты трансформации (гексановая, гептановая, октановая, нонановая и фталевая кислоты). Только на выходе из системы установлено наличие спиртов — этанола изопропанола, трет- и изобутанола. Присутствие кислородсодержащих углеводородов свидетельствует об использовании окислительного процесса в технологии утилизации свалочного газа.

Полагаем, что для оценки эффективности и химической безопасности для здоровья населения используемой технологии утилизации системы обезвреживания (очистки) свалочного газа недостаточно двух точек контроля (до и после системы утилизации). Необходим мониторинг на разных расстояниях от системы очистки полигона твёрдых бытовых отходов с оценкой опасности обнаруженных веществ путём сравнения их концентраций с соответствующими гигиеническими нормативами.

Заключение

Для адекватной оценки качества и химической безопасности, исключения вреда для здоровья населения и состояния окружающей среды при использовании здоровьесберегающих технологий важно применение высокоэффективных и чувствительных методов физико-химических исследований, позволяющих идентифицировать и количественно определять одновременно десятки загрязняющих веществ. Это позволит учитывать многокомпонентность химического состава и возможность возникновения негативных побочных эффектов в виде токсичных продуктов трансформации, воздействующих на человека в реальных условиях загрязнения окружающей среды.

Литература

1. Малышева А.Г., Юдин С.М. Трансформация химических веществ в окружающей среде как неучтенный фактор опасности для здоровья населения. *Химическая безопасность*. 2019; 3(2): 45–66. <https://doi.org/10.25514/CHS.2019.2.16005> <https://elibrary.ru/juagyd>
2. Малышева А.Г. Оценка химической безопасности природоохранных технологий по снижению загрязнения выбросов в атмосферу (на примере процессов лазерной обработки полимерных материалов). *Гигиена и санитария*. 2021; 100(3): 196–203. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-3-196-203> <https://elibrary.ru/camhsw>
3. Джамалова Г.А. Анализ изменчивости химического состава фильтрата и эмиссии биогаза при интенсивном анаэробном разложении твердых бытовых отходов. *Фундаментальные исследования*. 2015; (4–7): 669–74. <https://elibrary.ru/ugaqlb>
4. Любомирова В.Н., Романова Е.М., Романов В.В., Игнаткин Д.С. Оценка интегральной токсичности почв несанкционированных свалок твердых бытовых отходов Ульяновской области с использованием верми-культуры Е. FOETIDA. *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2015; (13): 3736–40. <https://elibrary.ru/twcpss>
5. Басов Ю.В. Влияние свалки бытовых отходов на агроэкологические показатели почвы. *Вестник Орловского государственного аграрного университета*. 2017; (2): 26–31. <https://elibrary.ru/ymvtaz>
6. Шилова Ю.О., Витковская С.Е. Токсичные компоненты твердых бытовых отходов как источник загрязнения почв. *Роль молодых ученых в решении актуальных задач АПК. Сборник научных трудов международной научно-практической конференции молодых ученых*. СПб.; 2017: 88–9. <https://elibrary.ru/ytlozb>
7. Малыгина Н.А., Рахимова В.Т., Дылдин А.Г., Шерстнев В.И. Минимизация негативного воздействия полигона твердых бытовых отходов на окружающую природную среду. *Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»*. Екатеринбург, 2015; 502–5.
8. Луканин А., Харламова М., Клеванова Е., Бурка М. Утилизация свалочного газа (биогаза) на примере полигона ТКО «Торбеево». *Экология и промышленность России*. 2021; 25(8): 10–3. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-8-10-13> <https://elibrary.ru/gzmxnn>

Original article

9. Касташ В.Д., Бычков О.А. Расчет приземных концентраций загрязняющих веществ в период рекультивационных работ на полигоне ТБО в районе деревни Новомихайловка. В кн.: *Избранные доклады 68-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых*. Томск; 2022: 179–81. <https://elibrary.ru/uxispy>
10. Маркин Е.П., Сергеева И.В., Пономарева А.Л., Шевченко Е.Н., Сергеева Е.С. Изучение влияния несанкционированных свалок твердых коммунальных отходов на загрязнение почв жилой зоны города Саратова. В кн.: *Вавиловские чтения – 2021: Сборник статей Международной научно-практической конференции, посвященной 134-летию со дня рождения академика Н.И. Вавилова*. Саратов: Амрит; 2022: 139–43. <https://elibrary.ru/xbepjv>
11. Новицкий М.Л., Азиатцева М.В. Современные тенденции, состояние и особенности рекультивации полигонов твердых бытовых отходов (обзор). *Биология растений и садоводство: теория, инновации*. 2022; (3): 29–42. <https://doi.org/10.36305/2712-7788-2022-3-164-29-42> <https://elibrary.ru/vdnoqr>
12. Горбовская А.Д., Хмиш В.Х.Х. Расчет образования биогаза при утилизации отходов на полигонах. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2016; (7–4): 20–4. <https://elibrary.ru/wfisisqp>
13. Бобоев Х.Б., Назаров Ш.Б., Иброхимов С.Ж. Определение количества и состава биогаза, образующегося на полигоне твердых бытовых отходов города Душанбе. *Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук*. 2018; (3): 91–7. <https://elibrary.ru/vlwjnb>
14. Замотаев И.В., Иванов И.В., Михеев П.В., Белобров В.П. Оценка состояния почв и растительности в районах размещения свалок и полигонов твердых бытовых отходов (обзор). *Почвоведение*. 2018; (7): 907–24. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18070109> <https://elibrary.ru/xzzgvv>
15. Жажков В.В., Чусов А.Н., Политаева Н.А. Исследование и оценка состава биогаза на полигоне ТКО и рекомендации по его использованию. *Экология и промышленность России*. 2021; 25(5): 4–9. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-5-4-9> <https://elibrary.ru/dnhhwi>
16. Герасимова Т.А., Лазарева Г.А., Быкова И.В., Савватеева О.А. Технологии утилизации биогаза. *Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Серия «Естественные и инженерные науки»*. 2018; (3): 9–15. <https://elibrary.ru/fryfla>
17. Кравцова Е.В., Контарева В.Ю. Сбор, накопление и транспортировка твердых бытовых отходов и несанкционированные свалки в Мило-
- тинском районе Ростовской области. В кн.: *Научные основы создания и реализации современных технологий здоровьесбережения. Материалы VI межрегиональной научно-практической конференции*. Волгоград; 2019: 273–6. <https://elibrary.ru/lmjklp>
18. Кононович В.М., Лысухо Н.А. Анализ методов утилизации биогаза с полигонов ТКО. В кн.: *Сахаровские чтения 2019 года: экологические проблемы XXI века: материалы 19-й международной научной конференции*. Минск; 2019: 47–50. <https://elibrary.ru/klmgup>
19. Боровский М.Я., Шакуро С.В., Борисов А.С., Богатов В.И. Полигоны твердых бытовых отходов и свалки как дополнительные источники углеводородного сырья и объекты экологического мониторинга. *Управление техносферой*. 2020; 3(2): 191–206. <https://doi.org/10.34828/UpSU.2020.26.81.003> <https://elibrary.ru/fnryab>
20. Климентова Е.Г., Лизунков А.В. Проблемы свалок твердых бытовых отходов в Ногинском районе Московской области. В кн.: *Рациональное природопользование-основа устойчивого развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Грозный; 2020: 284–8. <https://elibrary.ru/thzmfq>
21. Лобачева Л.В., Борисова Е.В. Моделирование процессов миграции загрязнений от свалки твердых бытовых отходов. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2020; 12(2): 369–85. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-2-369-385> <https://elibrary.ru/lpgdrz>
22. Мальшева А.Г., Козлова Н.Ю., Растянников Е.Г., Ермаков А.А., Шохин В.А. Физико-химические исследования для оценки химической безопасности и эффективности применения новой системы очистки свалочного газа на полигоне твердых бытовых отходов. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(11): 1103–8. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-11-1103-1108> <https://elibrary.ru/yobwze>
23. Милотина Н.О., Политаева Н.А., Зеленковский П.С., Подлипский И.И., Великосельская Е.С. Анализ методов очистки фильтрата полигонов твердых коммунальных отходов. *Вестник евразийской науки*. 2020; 12(3): 21. <https://doi.org/10.15862/03NZVN320> <https://elibrary.ru/jyvvsh>
24. Зенкевич М.Ю., Прокофьев В.Е., Янович К.В. К вопросу о загрязнении окружающей среды твердыми коммунальными отходами. В кн.: *Вопросы продуктивного взаимодействия в процессе обмена знаниями. Сборник научных трудов*. Казань; 2021: 249–53. <https://elibrary.ru/fuxlmv>

References

1. Malysheva A.G., Yudin S.M. Transformation of chemicals in the environment as an overlooked hazard factor for public health. *Khimicheskaya bezopasnost'*. 2019; 3(2): 45–66. <https://doi.org/10.25514/CHS.2019.2.16005> <https://elibrary.ru/juagyd> (in Russian)
2. Malysheva A.G. Estimation of chemical safety of environmental protection technologies for atmosphere pollution reduction (a case study of processes of laser treatment of polymer materials). *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100(3): 196–203. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-3-196-203> <https://elibrary.ru/camhew> (in Russian)
3. Dzhamalova G.A. Analysis of variability of chemical composition of the filtrate and of emissions of the biogas under intensive anaerobic decomposition of municipal solid waste. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015; (4-7): 669–74. <https://elibrary.ru/ugaqlb> (in Russian)
4. Lyubomirova V.N., Romanova E.M., Romanov V.V., Ignatkin D.S. Assessment of the integral toxicity of soils of unauthorized landfills of solid household waste in the Ulyanovsk region using E. FOETIDA. *Nauchno-metodicheskii elektronnyi zhurnal «Kontsept»*. 2015; (13): 3736–40. <https://elibrary.ru/twpcpx> (in Russian)
5. Basov Yu.V. The impact of landfill waste on agri-environmental indicators of soil. *Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017; (2): 26–31. <https://elibrary.ru/ymvraz> (in Russian)
6. Shilova Yu.O., Vitkovskaya S.E. Toxic components of solid household waste as a source of soil pollution. The role of young scientists in solving urgent problems of agriculture. In: *Collection of Scientific Papers of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists [Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh]*. St. Petersburg; 2017: 88–9. <https://elibrary.ru/ytlozb> (in Russian)
7. Malygina N.A., Rakhimova V.T., Dyldin A.G., Sherstnev V.I. Minimization of the negative impact of the landfill of solid household waste on the environment. In: *All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists with International Participation «Energy and resource conservation. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources» [Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem «Energio-i resursoberezhenie. Energoobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovlyayemye istochniki energii»]*. Ekaterinburg; 2015: 502–5. (in Russian)
8. Lukanin A.V., Kharlamova M.D., Klevanova E.S., Burka M.S. Landfill gas utilization on the example of the landfill «Torbevo». *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2021; 25(8): 10–3. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-8-10-13> <https://elibrary.ru/gzmxxn> (in Russian)
9. Kastash V.D., Bychkov O.A. Calculation of surface concentrations of pollutants during reclamation works at the landfill near the village of Novomikhailovka. In: *Selected Reports of the 68th University Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists [Izbrannye doklady 68-i Universietskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh]*. Tomsk; 2022: 179–81. <https://elibrary.ru/uxispy> (in Russian)
10. Markin E.P., Sergeeva I.V., Ponomareva A.L., Shevchenko E.N., Sergeeva E.S. Studying the influence of unauthorized landfills of municipal solid waste on soil pollution in the residential area of the city of Saratov. In: *Vavilov Readings – 2021: Collection of Articles of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 134th Anniversary of the Birth of Academician N.I. Vavilov [Vavilovskie chteniya – 2021: Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 134-letiyu so dnya rozhdeniya akademika N.I. Vavilova]*. Saratov: Amirit; 2022: 139–43. <https://elibrary.ru/xbepjv> (in Russian)
11. Novitsky M.L., Asiantseva M.V. Modern trends, state and features of reclamation of solid waste polygons (review). *Biologiya rastenii i sadovodstvo: teoriya, innovatsii*. 2022; (3): 29–42. <https://doi.org/10.36305/2712-7788-2022-3-164-29-42> <https://elibrary.ru/vdnoqr> (in Russian)
12. Gorbovskaya A.D., Khmish V.Kh.Kh. Calculation of biogas formation during waste disposal at landfills. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2016; (7–4): 20–4. <https://elibrary.ru/wfisisqp> (in Russian)
13. Boboev Kh.B., Nazarov Sh.B., Ibrohimov S.Z. Determination of the quantity and composition of the biogas educational on the range of solid waste wastes of the city Dushanbe. *Izvestiya Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan. Ordelelie fiziko-matematicheskikh, khimicheskikh, geologicheskikh i tekhnicheskikh nauk*. 2018; (3): 91–7. <https://elibrary.ru/vlwjnb> (in Russian)
14. Zamotaev I.V., Ivanov I.V., Mikheev P.V., Belobrov V.P. Assessment of the state of soils and vegetation in areas of landfills and municipal solid waste sites (a review). *Pochvovedenie*. 2018; (7): 907–24. <https://doi.org/10.1134/S1064229318070104> <https://elibrary.ru/tilvkd> (in Russian)
15. Zhazhkov V.V., Chusov A.N., Politaeva N.A. Research and assessment of biogas composition at the tko running and recommendations for its use. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2021; 25(5): 4–9. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-5-4-9> <https://elibrary.ru/dnhhwi> (in Russian)
16. Gerasimova T.A., Lazareva G.A., Bykova I.V., Savvateeva O.A. Biogas utilization technologies. *Vestnik Mezhdunarodnogo universiteta prirody, obshchestva i cheloveka «Dubna». Seriya «Estestvennye i inzhenernye nauki»*. 2018; (3): 9–15. <https://elibrary.ru/fryfla> (in Russian)
17. Kravtsova E.V., Kontareva V.Yu. Collection, accumulation and transportation of solid waste and unauthorized landfills in the Milyutinsky district of the Rostov region. In: *Scientific Foundations for the Creation and Implementation of Modern Health-Saving Technologies. Materials of the VI Interregional Scientific and Practical Conference [Nauchnye osnovy sozdaniya i realizatsii sovremennykh tekhnologii zdorov'esberazheniya. Materialy VI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii]*. Volgograd; 2019: 273–6. <https://elibrary.ru/lmjklp> (in Russian)
18. Kononovich V., Lysukho N.A. Analysis of methods of utilization of biogas from municipal solid waste landfill. In: *Sakharov Readings 2019: environmental problems of the XXI century: materials of the 19th International Scientific Conference [Sakharovskie chteniya 2019 goda: ekologicheskie problemy XXI veka: materialy 19-i mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii]*. Minsk; 2019: 47–50. <https://elibrary.ru/klmgup> (in Russian)
19. Borovsky M.Ya., Shakuro S.V., Borisov A.S., Bogatov V.I. Solid waste landfills and landfills as additional sources of hydrocarbon gas and environmental

- monitoring facilities. *Upravlenie tekhnosferoi*. 2020; 3(2): 191–206. <https://doi.org/10.34828/UdSU.2020.26.81.003> <https://elibrary.ru/fnryab> (in Russian)
20. Klimentova E.G., Lizunkov A.V. Problems of solid waste landfills in Noginsky district of Moscow region. Rational environmental management is the basis of sustainable development. In: *Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation [Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem]*. Grozny; 2020: 284–8. <https://elibrary.ru/thzmfg> (in Russian)
21. Lobacheva L.V., Borisova E.V. Simulation of pollution migration processes at municipal solid waste landfills. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2020; 12(2): 369–85. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-2-369-385> <https://elibrary.ru/lpgrdz> (in Russian)
22. Malysheva A.G., Kozlova N.Yu., Rastyannikov E.G., Ermakov A.A., Shokhin V.A. Physico-chemical investigations for the assessment of the chemical safety and efficacy of application of a new system of landfill gas purification at the solid domestic garbage dump. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2017; 96(11): 1103–8. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-11-1103-1108> <https://elibrary.ru/yobwze> (in Russian)
23. Milyutina N.O., Politaeva N.A., Zelenkovskii P.S., Podlipskiy I.I., Velikoselskaya E.S. Review of purification methods of municipal solid waste landfills leachate. *Vestnik evraziiskoi nauki*. 2020; 12(3): 21. <https://doi.org/10.15862/03NZVN320> <https://elibrary.ru/jyvvsh> (in Russian)
24. Zenkevich M.Yu., Prokof'ev V.E., Yanovich K.V. On the issue of environmental pollution by solid municipal waste. In: *Issues of Productive Interaction in the Process of Knowledge Exchange: Collection of Scientific Papers [Voprosy produktivnogo vzaimodeistviya v protsesse obmena znaniyami: sbornik nauchnykh trudov]*. Kazan'; 2021: 249–53. <https://elibrary.ru/fuxlmv> (in Russian)

Сведения об авторах

Малышева Алла Георгиевна, доктор биол. наук, профессор, вед. науч. сотр. отд. гигиены ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: AMalysheva@cspmz.ru

Стародубова Наталья Юрьевна, канд. биол. наук., начальник сводно-аналитического отд., ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: starodubova@cspmz.ru

Information about the authors

Alla G. Malysheva, DSc (Biology), professor, leading researcher of the Hygiene Department, Centre for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3112-0980> E-mail: AMalysheva@cspmz.ru

Natalya Yu. Starodubova, PhD (Biology), head of the Summary and Analytical Department, Centre for Strategic Planning of the Federal medical and biological agency, Moscow, 119121, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5072-204X> E-mail: starodubova@cspmz.ru