



Горбанёв С.А.¹, Копытенкова О.И.^{1,2,3}, Ганичев П.А.¹, Еремин Г.Б.¹,
Алексеева И.В.⁴, Джамбулов Р.Л.⁴, Маркова О.Л.¹, Зарицкая Е.В.¹,
Исаев Д.С.¹, Суворова О.К.², Федосеенко А.А.², Мироненко О.В.³

Влияние выбросов в атмосферный воздух завода по сжиганию осадков сточных вод

¹ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, 191036, Санкт-Петербург, Россия;

²ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», 191031, Санкт-Петербург, Россия;

³ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», 199034, Санкт-Петербург, Россия;

⁴ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», 191015, Санкт-Петербург, Россия

Введение. При традиционной очистке городских сточных вод осадки представляют собой важный побочный продукт. Сжигание считается наиболее эффективным и универсальным методом уменьшения массы осадков сточных вод (ОСВ) и их обеззараживания. Однако ситуация в районах расположения предприятий по сжиганию ОСВ в результате поступления в атмосферный воздух продуктов пиролитического процесса вызывает беспокойство граждан.

Цель исследования — на основе показателей загрязнения атмосферного воздуха и величины риска для здоровья населения, проживающего в зоне влияния заводов по сжиганию осадка ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», дать гигиеническую характеристику технологии сжигания ОСВ.

Материалы и методы. Объектами исследований являлись российские и зарубежные литературные источники, содержащие информацию о влиянии на атмосферный воздух населённых мест предприятий (цехов) по сжиганию осадков сточных вод; технологии сжигания осадков (илов) в псевдоожиженном слое; результаты осуществляемого ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» производственного экологического контроля атмосферного воздуха за трёхлетний период. На основе результатов анализа сформирована программа собственных исследований. Санитарно-химические исследования промышленных выбросов в атмосферный воздух выполнены химико-аналитическим центром «Арбитраж» ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (аттестат аккредитации РОСС RU.0001.510650). Для идентификации и количественной характеристики приоритетных загрязнений атмосферы использованы современные высокоточные аналитические методы.

Проведены расчёты рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе с использованием методов, утверждённых приказом Минприроды России¹.

Результаты. Анализ результатов измерений показал, что количественные показатели выбросов вредных (загрязняющих) веществ не превышают требований международных нормативных актов, большинство находится ниже предела обнаружения, а рассчитанные концентрации не превышают гигиенических нормативов. Полученные результаты расчёта канцерогенного риска для здоровья оцениваются как допустимые, вероятность развития дополнительных случаев заболеваний от воздействия всех исследованных канцерогенов на протяжении всей жизни у населения, постоянно проживающего в районе расположения предприятия, оценивается как незначительная (менее одного случая).

Ограничения исследования. В данном исследовании имелось ограничение, связанное с пределом обнаружения методики определения концентраций веществ, который тем не менее удовлетворяет цели исследования. Поскольку исследована проба неизвестного состава, оценивали весь возможный спектр веществ в составе выбросов. В составе выбросов присутствовали вещества, обладающие канцерогенным эффектом, однако в расчёт канцерогенного риска включали только те вещества, которые имели фактор канцерогенного потенциала.

Заключение. На сегодняшний день технология сжигания в печах с псевдоожиженным слоем — это наиболее экологичный и экономически целесообразный способ обезвреживания осадков сточных вод в условиях крупных мегаполисов, и заводы по сжиганию ОСВ не являются причиной возможного ухудшения здоровья населения района, непосредственно граничащего с предприятиями.

Ключевые слова: осадки сточных вод; сжигание осадков сточных вод; технологии обезвреживания; промышленные выбросы; загрязнение атмосферного воздуха

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике.

Для цитирования: Горбанев С.А., Копытенкова О.И., Ганичев П.А., Еремин Г.Б., Алексеева И.В., Джамбулов Р.Л., Маркова О.Л., Зарицкая Е.В., Исаев Д.С., Суворова О.К., Федосеенко А.А., Мироненко О.В. Влияние выбросов в атмосферный воздух завода по сжиганию осадков сточных вод. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(11): 1307–1314. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-11-1307-1314> <https://elibrary.ru/ytslyr>

Для корреспонденции: Копытенкова Ольга Ивановна, доктор мед. наук, гл. науч. сотр. отд. анализа рисков здоровью населения ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора; профессор кафедры «Техносферная и экологическая безопасность» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». E-mail: 5726164@mail.ru

Участие авторов: Горбанёв С.А. — концепция и дизайн исследования, выбор аналитических методов, написание текста, редактирование; Копытенкова О.И. — концепция и дизайн исследования, обработка экспериментальных материалов, анализ результатов измерения, статистическая обработка, написание текста; Ганичев П.А. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка экспериментальных материалов, анализ результатов измерения, статистическая обработка, обзор литературы, написание текста; Маркова О.Л., Алексеева И.В., Джамбулов Р.Л. — анализ результатов измерения, написание текста; Зарицкая Е.В. — выбор аналитических методов, анализ результатов измерения, написание текста; Еремин Г.Б. — обзор литературы, сбор и обработка экспериментальных материалов; Исаев Д.С. — обработка экспериментальных материалов, статистическая обработка, написание текста. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование выполнялось по контракту с ООО «Институт медико-экологических проблем и оценки риска здоровью — Строительство Проектирование» (ООО «ИМЭПОРЗ-СП»).

Поступила: 18.07.2022 / Принята к печати: 03.10.2022 / Опубликована: 30.11.2022

¹ Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 6 июня 2017 г. № 273 «Об утверждении методов расчётов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе».

Sergey A. Gorbanev¹, Olga I. Kopytenkova^{1,2,3}, Pavel A. Ganichev¹, Gennady B. Yeremin¹, Irina V. Alekseyeva⁴, Renat I. Dzhambulov⁴, Olga L. Markova¹, Ekaterina V. Zaritskaya¹, Daniil S. Isaev¹, Olga K. Suvorova², Anastasiya A. Fedoseenko², Olga V. Mironenko³

Impact of emissions into the atmospheric air of a sewage sludge incineration plant on public health

¹North-West Public Health Research Center, Saint-Petersburg, 191036, Russian Federation;

²Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, 191031, Russian Federation;

³Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, 199034, Russian Federation;

⁴Vodokanal of St.Petersburg, Saint-Petersburg, 199034, Russian Federation

Introduction. Urban wastewater sludge (UWS) is an important by-product of traditional urban wastewater treatment. Incineration is considered the most effective and universal method of reducing the volume of a large amount of UWS and their disinfection. However, the situation in the areas where the UWS incineration plants are located, as a result of the pyrolytic process products entering the atmospheric air, creates complete uncertainty and unpredictability of the development of events that can lead in certain situations to the formation of an additional risk to public health.

The purpose of the study. Hygienic characteristics of wastewater sludge incineration technology based on indicators of atmospheric air pollution and the magnitude of the risk to the health of the population living in the zone of influence of the implemented technology.

Materials and methods. At the first stage, the analysis of the information presented in the international databases PubMed, Scopus, and PRINCE was carried out. Based on the results of the analysis, a list of chemical compounds was formed to identify the qualitative composition and determine the amount of pollutants in industrial emissions into the atmospheric air during the implementation of wastewater sludge incineration technology. Sanitary and chemical studies of industrial emissions into the atmospheric air were carried out by the chemical analytical center "Arbitration" of the D.I. Mendeleev Institute for Metrology. Modern high-precision analytical methods have been used to identify and quantify priority atmospheric pollutants.

Results. Industrial emissions samples laboratory studies were carried out. Measurement results analysis showed that the indicators of quantitative emissions of harmful (polluting) substances do not exceed the international regulations requirements, most are below the detection limit, and the calculated concentrations do not exceed hygienic standards.

The assessment of carcinogenic health risk are determined as acceptable, the probability of developing diseases additional cases from exposure to all the studied carcinogens throughout life in the population permanently residing in the territory in the area of the enterprise location is assessed as insignificant (less than one case).

Limitations. In this study, there was a limitation associated with the method for determining concentrations of substances detection limit, which, nevertheless, satisfies the purpose of the study. Since a sample of unknown composition was taken, the entire possible substances spectrum in the emissions was evaluated. Substances with a carcinogenic effect were present in the emissions, but only those substances that had a carcinogenic potential factor were included in the carcinogenic risk assessment.

Keywords: sewage sludge; incineration of sewage sludge; recycling technologies; industrial emissions; atmospheric air pollution

Compliance with ethical standards. The study does not require the conclusion of the Biomedical ethics committee.

For citation: Gorbanev S.A., Kopytenkova O.I., Ganichev P.A., Eremin G.B., Alekseeva I.V., Dzhambulov R.L., Markova O.L., Zaritskaya E.V., Isaev D.S., Suvorova O.K., Fedoseenko A.A., Mironenko O.V. Impact of air emissions from sewage sludge incineration plant. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(11): 1307-1314. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-11-1307-1314> <https://elibrary.ru/ytslry> (In Russian)

For correspondence: Olga I. Kopytenkova, MD, PhD, DSci., Chief Researcher, Department of Public Health Risk Analysis, North-West Public Health Research Center, Saint-Petersburg, 191036, Russian Federation; Professor of the department "Technospheric and environmental safety" of the Saint-Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, 191031, Russian Federation. E-mail: 5726164@mail.ru

Information about the authors:

Gorbanev S.A., <https://orcid.org/0000-0002-5840-4185>
Kopytenkova O.I., <https://orcid.org/0000-0001-8412-5457>
Ganichev P.A., <https://orcid.org/0000-0003-0954-8083>
Yeremin G.B., <https://orcid.org/0000-0002-1629-5435>
Alekseeva I.V., <https://orcid.org/0000-0002-2978-3235>
Dzhambulov R.L., <https://orcid.org/0000-0002-1354-4483>
Markova O.L., <https://orcid.org/0000-0002-4727-7950>
Zaritskaya E.V., <https://orcid.org/0000-0003-2481-1724>
Isaev D.S., <https://orcid.org/0000-0002-9165-1399>
Suvorova O.K., <https://orcid.org/0000-0001-5826-5464>
Fedoseenko A.A., <https://orcid.org/0000-0003-0660-8650>
Mironenko O.V., <https://orcid.org/0000-0002-1484-8251>

Contribution: Gorbanev S.A. – research concept and design, selection of analytical methods, text writing, editing; Kopytenkova O.I. – research concept and design, processing of experimental materials, analysis of measurement results, statistical processing, text writing; Ganichev P.A. – research concept and design, collection and processing of experimental materials, analysis of measurement results, statistical processing, literature review, text writing; Markova O.L., Alekseeva I.V., Dzhambulov R.L. – analysis of measurement results, text writing; Zaritskaya E.V. – choice of analytical methods, analysis of measurement results, text writing; Eremin G.B. – literature review, collection and processing of experimental materials; Isaev D.S. – processing of experimental materials, statistical processing, writing text.

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

Acknowledgement. The study was carried out under a contract with LLC "Institute of Medical and Environmental Problems and Health Risk Assessment – Construction Design" (LLC "IMEPORZ–SP").

Received: July 7, 2022 / Accepted: October 3, 2022 / Published: November 30, 2022

Введение

Ежегодно в Российской Федерации на муниципальных сооружениях по очистке сточных вод образуется более 100 млн м³ осадков при средней влажности 96%. Объём и качество осадков, образующихся в процессе очистки сточных вод, зависят от многих факторов, в том числе от содержания загрязняющих веществ в исходной воде, технологической схемы очистки, развития и характера промышленности, а также от погодных явлений и времени года. Известно, что осадки сточных вод содержат в своём составе токсичные вещества (тяжёлые металлы и др.) и различные виды микрофлоры, в том числе патогенной. Таким образом, осадок городских очистных сооружений можно отнести к опасным в санитарно-эпидемиологическом отношении отходам и малоопасным IV класса опасности – в экологическом отношении, требующим специальной обработки с целью предотвращения загрязнения окружающей среды.

В мировой практике известно множество методов обезвреживания и утилизации осадков сточных вод. Наибольшее распространение получили экономически оправданные методы, к которым можно отнести хранение и захоронение, сжигание, пиролиз, анаэробное сбраживание, компостирование, а также использование в качестве удобрения или для рекультивации нарушенных земель [1–3]. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки. Для крупных городских агломераций одним из наиболее перспективных методов утилизации осадков сточных вод за рубежом в настоящее время является сжигание.

В странах ЕЭС термические методы составляют 20–40% от общего объёма переработки осадков, в Японии – 60%, в США – 16%. Сжигание позволяет получать тепло и энергию, однако требует чрезвычайно высоких затрат средств. Кроме того, представляется достаточно сложной утилизация золы, содержащей токсические вещества в концентрации, зависящей от качества сжигаемого осадка. Дополнительно в атмосферный воздух выделяются загрязнения, качественный состав и количество которых также определяются составом осадка, температурой сжигания и способами очистки промышленных выбросов [4–18].

Ввиду сложности решения в крупных городских агломерациях экологической проблемы, формируемой чрезвычайно большим объёмом ОСВ, гигиеническая характеристика реализованной в России технологии сжигания ОСВ для определения перспектив её использования является своевременной.

Цель исследования – на основе показателей загрязнения атмосферного воздуха и величины риска для здоровья населения, проживающего в зоне влияния заводов по сжиганию осадка ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», дать гигиеническую характеристику технологии сжигания ОСВ.

Материалы и методы

На первом этапе проведён анализ информации, представленной в международных базах данных PubMed, Scopus, а также РИНЦ. На основе результатов анализа сформирован перечень химических соединений для идентификации качественного состава и определения количества загрязняющих веществ в промышленных выбросах в атмосферный воздух при реализации технологии сжигания ОСВ.

Санитарно-химические исследования промышленных выбросов в атмосферный воздух выполнены химико-аналитическим центром «Арбитраж» ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». Для идентификации и количественной характеристики приоритетных загрязняющих веществ в атмосфере использованы современные высокоточные аналитические методы: высокоэффективная жидкостная хроматография с детектором на основе диодной матрицы (ВЭЖХ-ДМ), газовая хроматография с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ-МС), tandemная масс-спектрометрия с ионизацией в индуктивно связанной плазме (ИСП-МС/МС), атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС), атомно-

абсорбционная спектрометрия с зеемановской коррекцией неселективного поглощения (ААС-ЗКНР).

Выполнен расчёт рассеивания выбросов с помощью стандартного программного комплекса – программы расчёта загрязнения атмосферы УПРЗА «Эколог» версии 4.60 (ООО «Фирма «Интеграл», Россия).

Полученные концентрации загрязняющих веществ использовали при выполнении оценки канцерогенного риска для здоровья населения, проживающего в зоне влияния завода по сжиганию ОСВ. Оценка риска выполнена в соответствии с Руководством Р 2.1.10.1920–04². Проведена сравнительная оценка канцерогенного риска для здоровья населения. При расчёте учтены загрязнения, поступающие в атмосферный воздух при сгорании ОСВ (ПАУ, соединения металлов).

Результаты

В настоящее время в России действует стандарт³, который учитывает требования федерального закона⁴, документов по стандартизации (информационно-технических справочников наилучших доступных технологий ИТС НДТ 9, ИТС НДТ 10, ИТС НДТ 15), а также иных действующих документов⁵. Стандарт устанавливает требования к методам и оборудованию для обработки ОСВ, образующихся в процессе механической, физико-химической и биологической очистки сточных вод централизованных систем водоотведения поселений, городских округов.

Основными международными документами являются Директива N 91/271/ЕЭС⁶ и ЕСЕ/СЕС/ІР/РРР/2020/5/ООН⁷, в которых регламентируется обращение с ОСВ.

Реализуемая в настоящее время в России технология сжигания осадков сточных вод в печах с псевдоожиженным слоем используется с 1997 г. Максимальная производительность завода по сухому веществу – 7,8 тСВ/ч (187,2 тСВ/сут) [7–10]. Процесс протекает в псевдоожиженном слое кварцевого песка при температуре плюс 750–850 °С в четырёх печах сжигания. Температура слоя поддерживается в диапазоне плюс 750–770 °С. Органические частицы заканчивают горение в верхней части реактора при температуре плюс 850 °С. Время пребывания горючих органических веществ осадка в реакторе рассчитано для их полного сгорания. После этого минеральные остатки выносятся дымовыми газами.

Основным топливом является кек (обезвоженный осадок), газ используется в качестве вспомогательного топлива – для розжига печи и функционирования в режиме восходящей поддержки.

Температура сжигания осадков сточных вод является важным фактором, влияющим на состав выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. В соответствии с Директивой 2010/75/ЕС⁸ температура сжигания осадков

² Р 2.1.10.1920–04 Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду.

³ ГОСТ Р 59748–2021 «Технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования» от 01.11.2021 г.

⁴ ФЗ № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» от 24 июня 1998 г.

⁵ СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения» от 26 июня 2019 г.

⁶ Директива N 91/271/ЕЭС Совета Европейских сообществ «Об очистке городских сточных вод».

⁷ ЕСЕ/СЕС/ІР/РРР/2020/5/ООН. Европейская экономическая комиссия. Комитет по инновационной деятельности, конкурентоспособности и государственно-частным партнёрствам. Руководящие принципы поощрения проектов государственно-частных партнёрств на благо людей в области преобразования отходов в энергию, в интересах развития экономики замкнутого цикла.

⁸ Директива о промышленных выбросах 2010/75/ЕС (Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). Директивы Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/75/ЕС от 24 ноября 2010 г. «О промышленных выбросах», Директивы 98/15 ЕС Европейской комиссии от 27.02.1998 г.; Регламента (ЕС) 1882/2003 Европарламента и Совета ЕС от 29.09.2003 г.; Директивы 2013/64 ЕС Совета ЕС от 17.12.2013 г.

Таблица 1 / Table 1

Результаты лабораторных исследований проб промышленных выбросов при сжигании осадков сточных вод
Results of laboratory studies of samples of industrial emissions from the incineration of sewage sludge

Диоксины/фураны Dioxins/furans		Целевые компоненты Target components			
показатель indicators	концентрация, пг/м ³ concentration, pg/m ³	показатель indicators	концентрация, пг/м ³ concentration, pg/m ³	показатель indicators	концентрация, пг/м ³ concentration, pg/m ³
2,3,7,8-ТХДД 2,3,7,8-TCDD	< 1	Кадмий / Cadmium (Cd)	< 0.003	Нафталин / Naphthalene	2.2 · 10 ⁻³
1,2,3,7,8-ПеХДД 1,2,3,7,8-PeCDD	< 1	Ванадий / Vanadium (V)	< 0.001	Аценафтилен / Acenaphthylene	2.4 · 10 ⁻³
1,2,3,4,7,8-ГкХДД 1,2,3,4,7,8-GcCDD	< 2	Марганец / Manganese (Mn)	< 0.01	Аценафтен / Acenaphthene	0.61 · 10 ⁻³
1,2,3,6,7,8-ГкХДД 1,2,3,6,7,8-GcCDD	< 2	Никель / Nickel (Ni)	< 0.002	Флуорен / Fluorene	6.5 · 10 ⁻³
1,2,3,7,8,9-ГкХДД 1,2,3,7,8,9-GcCDD	< 2	Свинец / Lead (Pb)	< 0.001	Фенантрен / Phenantrene	5.3 · 10 ⁻³
1,2,3,4,6,7,8-ГпХДД 1,2,3,4,6,7,8-GpCDD	< 5	Кобальт / Cobalt (Co)	< 0.01	Антрацен / Anthracene	0.056 · 10 ⁻³
ОХДД OHDD	< 10	Мышьяк / Arsenic (As)	< 0.02	Флуорантен / Fluoranthene	11 · 10 ⁻³
	< 10	Медь / Copper (Cu)	< 0.015	Пирен / Pyrene	4.9 · 10 ⁻³
	< 10	Кремний / Silicon (Si)	< 0.2	1,2-Бенз(а)антрацен 1,2-Benz(a)anthracene	0.27 · 10 ⁻³
	< 10	Хром / Chrome (Cr)	< 0.0015	Хризен / Chrysen	0.69 · 10 ⁻³
	< 10	Ртуть / Mercury (Hg)	0.0058	Бенз(б)флуорантен Benz(b)fluoranthene	0.65 · 10 ⁻³
1,2,3,6,7,8-ГкХДФ 1,2,3,6,7,8-GcCDF	< 2	Взвешенные частицы пыли Suspended dust particles	1.98	Бенз(к)флуорантен Benz(k)fluoranthene	0.27 · 10 ⁻³
2,3,4,6,7,8-ГкХДФ 2,3,4,6,7,8-GcCDF	< 2	Пыль неорганическая: 70–20% SiO ₂ (по кремнию) Dust inorganic: 70–20% SiO ₂ (for silicon)	< 0.2	Бенз(л) флуорантен Benz(l) fluoranthene	0.49 · 10 ⁻³
1,2,3,7,8,9-ГкХДФ 1,2,3,7,8,9-GcCDF	< 2	Хром шестивалентный (Cr (VI)) Chromium hexavalent (Cr(VI))	< 0.08	Бенз(е)пирен Benz(e)pyrene	0.74 · 10 ⁻³
1,2,3,4,6,7,8-ГпХДФ 1,2,3,4,6,7,8-GpCDF	< 5	Формальдегид Formaldehyde	0.02	Бенз(а)пирен (3,4-Бензпирен) Benz(a)pyrene (3,4-Benzpyrene)	0.26 · 10 ⁻³
1,2,3,4,7,8,9-ГпХДФ 1,2,3,4,7,8,9-GpCDF	< 5	Додекан Dodecan	0.33	Бенз(а)пирен (3,4-Бензпирен) Benz(a)pyrene (3,4-Benzpyrene)	0.26 · 10 ⁻³
ОХДФ OHDF	< 10	Тридекан Tridecan	< 0.01	Дибенз(а,н)антрацен Dibenz(a,h)anthracene	0.034 · 10 ⁻³
	< 10	Тетрадекан Tetradecane	< 0.01	Дибенз(а,н)антрацен Dibenz(a,h)anthracene	0.034 · 10 ⁻³
	< 10	Пентадекан Pentadecan	< 0.01	Индено (1,2,3-с,д) пирен Indeno (1,2,3-c,d) pyrene	0.047 · 10 ⁻³
Прочие ГкХДД Other GkHDD	—	Гексадекан Hexadecane	< 0.01	Индено (1,2,3-с,д) пирен Indeno (1,2,3-c,d) pyrene	0.047 · 10 ⁻³
Прочие ГпХДД Other GpCDD	—	Гептадекан Heptadecane	< 0.01	Бенз(г,н,и)перилен Benz(g,h,i)perylene	0.35 · 10 ⁻³
	—	Октадекан Octadecan	< 0.01	Бенз(г,н,и)перилен Benz(g,h,i)perylene	0.35 · 10 ⁻³
	—	Нонадекан Nonadecan	< 0.01	—	—
Прочие ГкХДФ Other GcHDF	—	Алканы C12–C19 (сумма) Alkanes C12–C19 (sum)	< 0.08	—	—
Прочие ГпХДФ Other GpCDF	—	Гидроксибензол (Фенол) Hydroxybenzene (Phenol)	< 0.01	—	—

Таблица 2 / Table 2

Результаты лабораторных исследований проб атмосферного воздуха в жилой зоне на границе СЗЗ предприятий по сжиганию ОСВ
Results of laboratory studies of atmospheric air samples in a residential area at the border of the sanitary protection zones (SPZ)

Дioxины/фураны Dioxins/furans		Целевые компоненты Target components			
показатель indicators	концентрация, пг/м ³ concentration, pg/m ³	показатель indicators	концентрация, пг/м ³ concentration, pg/m ³	показатель indicators	концентрация, пг/м ³ concentration, pg/m ³
2,3,7,8-ТХДД 2,3,7,8-TCDD	< 0.1	Кадмий / Cadmium (Cd)	< 0.00015	Алканы C12–C19 (сумма) Alkanes C12–C19 (sum)	0.008
1,2,3,7,8-ПeХДД 1,2,3,7,8-PeCDD	< 0.2	Ванадий / Vanadium (V)	< 0.001	Гидроксибензол (Фенол) Hydroxybenzene (Phenol)	< 0.001
1,2,3,4,7,8-ГкХДД 1,2,3,4,7,8-GcCDD	< 0.2	Марганец / Manganese (Mn)	< 0.0005	Нафталин / Naphthalene	130 · 10 ⁻⁶
1,2,3,6,7,8-ГкХДД 1,2,3,6,7,8-GcCDD	< 0.2	Никель / Nickel (Ni)	< 0.0005	Аценафтилен / Acenaphthylene	2 · 10 ⁻⁶
1,2,3,7,8,9-ГкХДД 1,2,3,7,8,9-GcCDD	< 0.2	Свинец / Lead (Pb)	< 0.00015	Аценафтен / Acenaphthene	5.1 · 10 ⁻⁶
1,2,3,4,6,7,8-ГпХДД 1,2,3,4,6,7,8-GpCDD	< 0.4	Кобальт / Cobalt (Co)	< 0.0002	Флуорен / Fluorene	8.1 · 10 ⁻⁶
ОХДД OHDD	< 0.4	Мышьяк / Arsenic (As)	< 0.00015	Фенантрен / Phenantrene	27 · 10 ⁻⁶
	< 0.4	Медь / Copper (Cu)	< 0.001	Антрацен / Anthracene	1.1 · 10 ⁻⁶
	< 0.4	Кремний / Silicon (Si)	< 0.1	Флуорантен / Fluoranthene	2.8 · 10 ⁻⁶
	< 0.4	Хром / Chrome (Cr)	< 0.00075	Пирен / Pyrene	2.4 · 10 ⁻⁶
1,2,3,6,7,8-ГкХДФ 1,2,3,6,7,8-GcCDF	< 0.2	Ртуть / Mercury (Hg)	0.20 · 10 ⁻⁶	1,2-Бенз(а)нтрацен 1,2-Benz(a)nthracene	0.11 · 10 ⁻⁶
	< 0.2	Взвешенные частицы пыли Suspended dust particles	< 0.04	Хризен / Chrysen	0.34 · 10 ⁻⁶
2,3,4,6,7,8-ГкХДФ 2,3,4,6,7,8-GcCDF	< 0.2	Взвешенные частицы пыли PM ₁₀ Suspended dust particles PM ₁₀	< 0.24	Бенз(Ј) флуорантен Benz(J) fluoranthene	0.36 · 10 ⁻⁶
1,2,3,7,8,9-ГкХДФ 1,2,3,7,8,9-GcCDF	< 0.2	Взвешенные частицы пыли PM _{2.5} Suspended dust particles PM _{2.5}	< 0.12	Бенз(Ј) флуорантен Benz(J) fluoranthene	0.25 · 10 ⁻⁶
1,2,3,4,6,7,8-ГпХДФ 1,2,3,4,6,7,8-GpCDF	< 0.4	Пыль неорганическая: 70–20% SiO ₂ (по кремнию) Dust inorganic: 70–20% SiO ₂ (for silicon)	< 0.1	Бенз(Ј) флуорантен Benz(J) fluoranthene	0.15 · 10 ⁻⁶
1,2,3,4,7,8,9-ГпХДФ 1,2,3,4,7,8,9-GpCDF	< 0.4	Хром шестивалентный (Cr (VI)) Chromium hexavalent (Cr(VI))	< 0.08	Бенз(е)пирен Benz(e)pyrene	0.27 · 10 ⁻⁶
ОХДФ OHDF	< 0.4	Формальдегид Formaldehyde	0.01	Бенз(а)пирен (3,4-Бензпирен) Benz(a)pyrene (3,4-Benzpyrene)	0.17 · 10 ⁻⁶
	< 0.4	Додекан Dodecan	0.008	Дибенз(а,һ)антрацен Dibenz(a,h)anthracene	< 0.1 · 10 ⁻⁶
	< 0.4	Тридекан Tridecan	< 0.001	Индено (1,2,3-с,д) пирен Indeno (1,2,3-c,d) pyrene	0.16 · 10 ⁻⁶
Прочие ГкХДД Other GcCDD	–	Тетрадекан Tetradecane	< 0.001	Бенз(ɡ,һ,і)перилен Benz(g,h,i)perylene	0.13 · 10 ⁻⁶
Прочие ГпХДД Other GpCDD	–	Пентадекан Pentadecan	< 0.001	–	–
	–	Гексадекан Hexadecane	< 0.001	–	–
	–	Гептадекан Heptadecane	< 0.001	–	–
	–	Октадекан Octadecan	< 0.001	–	–
Прочие ГкХДФ Other GcCDF	–	Нонадекан Nonadecan	< 0.001	–	–

должна быть не ниже плюс 850 °С, время пребывания газов в печи — не менее 2 с. Для иных отходов, содержащих более 1% хлорорганических соединений, минимальная температура горения должна составлять плюс 1100 °С.

Недостатком метода сжигания ОСВ считается возможная эмиссия в окружающую среду высокоопасных экотоксикантов — диоксинов. Химическое название диоксина — 2,3,7,8-тетрахлородибензо-*p*-диоксин (ТХДД). Название «диоксины» часто используется для семейства структурно и химически связанных полихлорированных дибензо-парадиоксинов (ПХДД) и полихлорированных дибензофуранов (ПХДФ). Некоторые диоксиноподобные полихлорированные бифенилы (ПХБ) с похожими токсическими свойствами также входят в понятие «диоксины». Всего было выявлено 419 типов относящихся к диоксинам соединений, но лишь 30 из них имеют значительную токсичность, а самыми токсичными являются ТХДД [10–16].

Выполненный анализ особенностей используемой технологии сжигания ОСВ, а также результатов производственного экологического контроля атмосферного воздуха за пятилетний период позволил разработать программу исследований выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух. Сформирован рабочий вариант перечня загрязняющих веществ, включающий 17 соединений и дополнительно диоксины (16 компонентов). Список веществ уточнён в соответствии с их токсикологическими и гигиеническими характеристиками и включает следующую информацию: CAS — регистрационный номер химического соединения в реестре Chemical Abstracts Service; МАИР — классификацию международного агентства по изучению рака; значения ПДК; факторы канцерогенного потенциала (в соответствии с Руководством²).

В результате выполненного анализа проб промышленных выбросов на содержание загрязняющих веществ идентифицированы и измерены концентрации 140 химических соединений. В табл. 1 представлены результаты определения наиболее значимых загрязняющих веществ, характеризующих процесс сжигания осадков на изучаемом предприятии. В табл. 2 приведены результаты исследования проб атмосферного воздуха в жилой зоне на границе СЗЗ предприятий по сжиганию ОСВ.

Обсуждение

Полученные данные подтверждают наличие в выбросах в атмосферный воздух соединений, относящихся к 1–4-му классам опасности и различным классам химических соединений: серосодержащие соединения, альдегиды, ароматические углеводороды, алифатические углеводороды, спирты, сложные эфиры, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), диоксины/фураны, металлы, галогенсодержащие соединения (хлорорганические соединения). Широкий перечень загрязняющих веществ включает продукты неполного сгорания соединений, характерных для химического состава илов очистных сооружений и для различных условий процесса сжигания на заводах.

Тяжёлые металлы составляют в осадке сточных вод, как правило, до 2% от общего сухого веса осадка. Основное внимание в исследовании уделено определению летучих тяжёлых металлов (Hg, Pb и Cd), которые встречаются в выбросах. В пробах промышленных выбросов были идентифицированы соединения ртути (Hg), содержание которой колебалось в диапазоне 0,0048–0,0067 мг/м³.

Концентрация Pb отмечена в интервале от 0,0007–0,005 мг/м³. Концентрации кадмия в выбросах на всех обследованных объектах составляла менее 0,0003 мг/м³.

Установленное содержание соединений тяжёлых металлов в промышленных выбросах показало, что концентрации, за исключением никеля, находятся ниже предела обнаружения: Ni (< 0,002–0,052 мг/м³), V (< 0,001 мг/м³), Cu (< 0,015 мг/м³), Co (< 0,01 мг/м³), Cr (VII) (< 0,08 мг/м³), Mn (< 0,01 мг/м³) и As (< 0,02 мг/м³).

Проведённые исследования подтвердили, что применение систем газоочистки, включающих скрубберы Вентури, электростатические пылеуловители, мокрые скрубберы, эффективно снижает концентрации тяжёлых металлов в промышленных выбросах обследуемых объектов.

В отличие от ЛОС, металлов, диоксинов полициклические ароматические соединения в выбросах, образующихся при сжигании осадков сточных вод, не являются приоритетными. Они типичны для выбросов транспортных средств, электростанций, химической и нефтяной промышленности.

При сжигании ОСВ в промышленных выбросах основные загрязняющие вещества — это соединения серы, что обусловлено со значительным содержанием серы в иле. В исследуемых пробах были выявлены диоксид серы, карбонилсульфид, метилмеркаптан, дисульфид углерода, изопротилмеркаптан.

Обнаруженные концентрации взвешенных веществ находились в диапазоне 0,9–2,2 мг/м³. Летучие и среднелетучие органические соединения классифицированы по следующим химическим классам: альдегиды, кетоны, фенолы, алифатические углеводороды, ароматические углеводороды, спирты, сложные эфиры, фталаты. Содержание большинства из них (13) не превышало нижнего предела определения методики. Концентрация фенола находилась в диапазоне < 0,01–0,022 мг/м³. Концентрации 14 веществ, относящихся к алифатическим углеводородам, находились ниже предела определения метода. Суммарная концентрация C₁₂–C₁₉H_{26–40} составила < 0,08–0,44 мг/м³. Из группы ароматических углеводородов значимыми оказались толуол и производные бензола, всего идентифицировано 9 соединений. Наибольший вклад вносит толуол, его содержание находилось в диапазоне 0,18–0,24 мг/м³.

Менее многочисленными классами являлись спирты, эфиры, нитрилы, фталаты. Концентрации данных соединений отмечались на уровне 0,01–0,09 мг/м³.

Результаты сравнения полученных данных с требованиями Директивы Европейского парламента и Совета Европейского союза ЕС 2010/75/ЕС от 24 ноября 2010 г. представлены в табл. 3. В таблице указаны пороговые значения выбросов, характеризующие концентрации, которые не могут быть превышены в течение определённого периода.

Результаты анализа позволяют сделать вывод о выполнении требований Директивы Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/75/ЕС от 24 ноября 2010 г. «О промышленных выбросах», Директивы 98/15 ЕС Европейской комиссии от 27.02.1998 г.; Регламента (ЕС) 1882/2003 Европарламента и Совета ЕС от 29.09.2003 г.; Директивы 2013/64 ЕС Совета ЕС от 17.12.2013 г.

Максимальный объём выбросов из печей заводов сжигания осадка ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» по отношению к общему объёму выбросов с площадок очистных сооружений составляет 23%. Непосредственный вклад выбросов из печей заводов сжигания осадка в общий объём выбросов от прилегающих городских районов составляет не более 0,35%, а твёрдых загрязняющих веществ — не более 1,43%.

Анализ результатов измерений показал, что количественные показатели выбросов вредных (загрязняющих) веществ не превышают требований международных нормативных актов, большинство находится ниже предела обнаружения, а рассчитанные концентрации не превышают гигиенических нормативов.

Условия проведения оценки риска обозначены исходя из того, что при сжигании ОСВ наиболее опасными (приоритетными) по влиянию на здоровье населения выбросами, обладающими канцерогенным эффектом, являются диоксины [12–18]. Поэтому нами был проведён только расчёт канцерогенного риска для здоровья населения.

Вероятность развития канцерогенных эффектов от воздействия вредных выбросов завода по сжиганию ОСВ оценена для следующих канцерогенных веществ: оксид кадмия (в пересчёте на кадмий); оксид кобальта (в пересчёте на

Таблица 3 / Table 3

Перечень загрязняющих веществ и их характеристики
List of pollutants and their characteristics

Наименование загрязняющего вещества Name of the polluting substance	Класс опасности Hazard class	Пороговое значение выбросов Threshold value of emissions	Результат измерений, максимальное значение Measurement result, maximum value
Азота диоксид, мг/м ³ (Nitrogen dioxide, mg/m ³)	III	≤ 200 суммарно / total	Отсутствует / Absent
Азота оксид, мг/м ³ (Dinitrogen oxide, mg/m ³)	III	≤ 200 суммарно / total	Отсутствует / Absent
Серы диоксид, мг/м ³ (Sulfur dioxide, mg/m ³)	III	≤ 50	0.19
Углерода оксид, мг/м ³ (Carbon monoxide, mg/m ³)	IV	≤ 50	Отсутствует / Absent
Взвешенные вещества, мг/м ³ (Suspended substances, mg/m ³)	III	≤ 10	2.15
Бенз(а)пирен, мг/м ³ (Benzo[a]pyrene, mg/m ³)	I	≤ 0.001	0.00028
Хлористый водород, мг/м ³ (Hydrochloric acid, mg/m ³)	II	≤ 10	Отсутствует / Absent
Фтористый водород мг/м ³ (Hydrofluoric acid, mg/m ³)	II	≤ 1	Отсутствует / Absent
Диоксины (в пересчёте на 2,3,7,8-тетрахлордibenзо-1,4-диоксин), пг/м ³ Dioxins (2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin), pg/m ³	I	≤ 100	1.9
Ртуть и её соединения, мг/м ³ (Mercury and compounds, mg/m ³)	I	≤ 0.05	0.0067
Кадмий + таллий, мг/м ³ (Cadmium + Thallium, mg/m ³)	I	≤ 0.05	< 0.003
Сурьма и её соединения, As и его соединения, Pb и его соединения, Cr и его соединения, Co и его соединения, Cu и её соединения, Mn и его соединения, Ni и его соединения, V и его соединения, мг/м ³ Antimony and compounds, As and compounds, Pb and compounds, Cr and compounds, Co and compounds, Cu and compounds, Mn and compounds, Ni and compounds, V and compounds, mg/m ³	—	≤ 0.5 суммарно ≤ 0.5 in total	0.0067

кобальт); никель и его соединения; свинец и его неорганические соединения (в пересчёте на свинец); хром общий (в пересчёте на оксид хрома (VI)); мышьяк, неорганические соединения (в пересчёте на мышьяк); 1,3-бутадиен, бенз(а)пирен, дихлорметан (метиленхлорид); дихлорид метана; бихлорид метилена; хлорид метилена; дихлорид метилена); ацетальдегид (уксусный альдегид), формальдегид (муравьиный альдегид, оксметан, метиленоксид); прочие ТХДД; прочие ПexДД; прочие ТХДФ; прочие ПexДФ; бенз[а]антрацен; хризен; бензо[б]флуорантен; бензо[к]флуорантен; бензо[а]флуорантен; бензо[к]флуорантен; дибенз[а, h]антрацен; индено[1,2,3-c,d]пирен.

В большинстве стран, а также согласно рекомендациям экспертов ВОЗ, величина целевого риска принимается равной 10⁻⁶. Величина целевого риска для условий населённых мест в России составляет 10⁻⁵–10⁻⁶. Установлено, что индивидуальные канцерогенные риски от воздействия канцерогенов для здоровья населения, проживающего в зоне влияния завода по сжиганию ОСВ, регистрируются на уровне 10⁻⁶–10⁻¹², что ниже уровня целевого риска для условий населённых мест в России.

На границе предприятия максимальное значение суммарного канцерогенного риска для здоровья составило 2,09 · 10⁻⁶, на территории жилой зоны – 1,46 · 10⁻⁶. Основной вклад в уровень суммарного канцерогенного риска на территории жилой зоны вносит хром общий в пересчёте на оксид хрома (VI). Уровни канцерогенного риска для здоровья от воздействия канцерогенных веществ в точках воздействия (рецепторных точках) на границе предприятия и жилой зоны соответствуют второму диапазону рисков: в течение всей жизни – более 1 · 10⁻⁶, но менее 1 · 10⁻⁴. Это соответствует предельно допустимому риску, то есть верхней границе приемлемого риска. Данные уровни подлежат постоянному контролю. В некоторых случаях при таких уровнях риска могут проводиться дополнительные мероприятия по их снижению.

В расчётах популяционного риска учтено всё потенциально экспонируемое население (477 917 человек). Анализ полученных результатов популяционного канцерогенного риска свидетельствует, что вероятность развития заболева-

ний на протяжении всей жизни у населения, постоянно проживающего на жилых территориях в зоне влияния предприятия по сжиганию ОСВ, определена на уровне 0,69725139.

Таким образом, вероятность развития дополнительных случаев заболеваний от воздействия всех исследованных канцерогенов на протяжении всей жизни у населения, постоянно проживающего на территории в районе расположения предприятия, оценивается как незначительная (менее одного случая).

В данном исследовании имелось ограничение, связанное с пределом обнаружения методики определения концентраций веществ, который тем не менее удовлетворяет цели исследования. Поскольку были исследованы пробы неизвестного состава, оценивали весь возможный спектр веществ в составе выбросов. Были обнаружены вещества, обладающие канцерогенным эффектом, однако в расчёт канцерогенного риска включали только те из них, которые имели фактор канцерогенного потенциала.

Заключение

1. Вопросы обращения с отходами производств, в том числе с осадками сточных вод как источником загрязнения окружающей среды, в достаточной мере регулируются современным законодательством – как российским, так и европейским.

2. Перечень химических соединений, идентифицированных в пробах промышленных выбросов, наряду с традиционными крупнотоннажными загрязнителями включает специфические вещества 1–4-го классов опасности (соединения металлов, диоксины, летучие и среднелетучие соединения и др.). Количественная и качественная характеристика состава промышленных выбросов зависит от состава и характеристики сжигаемого осадка, величины загрузки печей и соблюдения условий технологического процесса. Класс полициклических ароматических соединений не является типичным загрязнителем от завода по сжиганию ОСВ, однако вещества этого класса присутствовали в выбросах. Концентрации рассмотренных веществ, содержащихся в дымовых газах ЗСО, не превышают значений технологических

показателей выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, соответствующих наилучшим доступным технологиям.

3. Расчёты рассеивания загрязняющих веществ при сжигании ОСВ позволили определить приземные концентрации загрязнений на границе СЗЗ предприятия и на территории ближайшей жилой застройки. Результаты расчёта канцерогенного риска, выполненного с учётом возможных эффектов суммации, позволили выявить приемлемые уровни показателей канцерогенного риска (на уровне 10^{-6}).

4. Выбросы предприятия по сжиганию осадков сточных вод в настоящее время не являются причиной возмож-

ного ухудшения здоровья населения районов, непосредственно граничащих с предприятием.

5. Полициклические ароматические соединения (в отличие от ЛОС, металлов, диоксинов) не являются приоритетными в исследованиях выбросов при сжигании осадков сточных вод.

6. Опыт ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» по эксплуатации заводов по сжиганию осадков подтверждает, что на сегодняшний день сжигание в печах с псевдоожиженным слоем — это наиболее экологичный и экономически целесообразный способ обезвреживания осадков сточных вод в условиях крупных мегаполисов.

Литература

(п.п. 11–18 см. References)

1. Рублевская О.Н. Опыт ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» по внедрению технологий утилизации осадка сточных вод. В кн.: *Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения. Материалы международной конференции, посвященной 145-летию УП «Минскводоканал»*. Минск; 2019: 70–5.
2. Зарицкая Е.В., Ганичев П.А., Михеева А.Ю., Маркова О.Л., Еремин Г.Б., Мясников И.О. К вопросу о контроле летучих загрязняющих соединений, формирующих запахи, при деятельности канализационных очистных сооружений. *Здоровье населения и среда обитания*. 2020; (10): 52–5. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-331-10-52-55>
3. Маркова О.Л., Ганичев П.А., Зарицкая Е.В., Копытенкова О.И., Еремин Г.Б. О выборе приоритетных веществ для оценки выбросов заводов по сжиганию осадков сточных вод. В кн.: *Анализ риска здоровья — 2022. Фундаментальные и прикладные аспекты обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения. Совместно с международной встречей по окружающей среде и здоровью RISE-2022: Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Пермь; 2022: 352–7.
4. Копытенкова О.И., Еремин Г.Б., Мозжухина Н.А., Маркова О.Л., Ганичев П.А. К вопросу сжигания осадков сточных вод. В кн.: *Актуальные вопросы гигиены: сборник научных трудов VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Санкт-Петербург; 2021: 167–71.
5. Копытенкова О.И., Ганичев П.А., Маркова О.Л. К вопросу о контроле атмосферного воздуха при использовании технологии сжигания осадков сточных вод. Краткий обзор. *Здоровье населения и среда обитания — ЗНиСО*. 2022; (5): 15–22. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-5-15-22>
6. Носков С.Н., Маркова О.Л., Ганичев П.А., Еремин Г.Б. Анализ нормативно-правового регулирования загрязнения атмосферного воздуха на площадках размещения илов канализационных очистных сооружений при установлении санитарной защитной зоны по ольфакторному критерию воздействия. В кн.: *Актуальные вопросы гигиены: Сборник научных трудов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию з.д.н. РФ, академика РАЕН, профессора Г.В. Сельюжского*. Санкт-Петербург; 2022: 203–10.
7. Носков С.Н., Маркова О.Л., Еремин Г.Б., Зарицкая Е.В., Исаев Д.С. Количественное и качественное определение газов, образующихся на иловых площадках канализационно-очистных сооружений. *Здоровье населения и среда обитания — ЗНиСО*. 2022; 30(7): 40–7. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-7-40-47>
8. Магомедов Х.К., Белкин А.С., Носков С.Н., Фридан К.Б. Гигиеническая оценка метода геотубирования осадков городских очистных сооружений канализации. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(7): 623–6. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-7-623-626>
9. Заводовская Е.В. *Разработка технологии подготовки обезвоженных осадков сточных вод очистных сооружений канализации к расширенной утилизации*. Дисс. ... канд. техн. наук. М.; 2009.
10. Кноер П., Бюхлер М., Пуассон А., Чепурнов А.В. Низкотемпературная двухступенчатая сушка осадка сточных вод. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2012; (4): 7а–11.

References

1. Rublevskaya O.N. Experience of State Unitary Enterprise «Vodokanal of St. Petersburg» in the implementation of sewage sludge disposal technologies. In: *Modern trends in the development of water supply and sanitation. Materials of the international conference dedicated to the 145th anniversary of UE «Minskvodokanal» [Sovremennyye tendentsii v razvitiye vodosnabzheniya i водоотведения. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy 145-letiyu UP «Minskvodokanal»]*. Minsk; 2019: 70–5. (in Russian)
2. Zaritskaya E.V., Ganichev P.A., Mikheeva A.Yu., Markova O.L., Eremin G.B., Myasnikov I.O. On the issue of monitoring odor-generating volatile pollutants during sewage treatment plant operation. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2020; (10): 52–5. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-331-10-52-55> (in Russian)
3. Markova O.L., Ganichev P.A., Zaritskaya E.V., Kopytenkova O.I., Eremin G.B. On the choice of priority substances for assessing emissions from sewage sludge incinerators. In: *Health risk analysis — 2022. Fundamental and Applied Aspects of Ensuring the Sanitary and Epidemiological Well-Being of the Population. Together with the International Meeting on Environment and Health RISE-2022: Materials of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation [Analiz riska zdorov'yu — 2022. Fundamental'nye i prikladnye aspekty obespecheniya sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya. Sovmestno s mezhdunarodnoy vstrechey po okruzhayushchey srede i zdorov'yu RISE-2022. Materialy XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem]*. Perm'; 2022: 352–7. (in Russian)
4. Kopytenkova O.I., Eremin G.B., Mozhukhina N.A., Markova O.L., Ganichev P.A. On the issue of sewage sludge incineration. In: *Topical Issues of Hygiene: A Collection of Scientific Papers of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation [Aktual'nye voprosy gigieny: sbornik nauchnykh trudov VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem]*. St. Petersburg; 2021: 167–71. (in Russian)
5. Kopytenkova O.I., Ganichev P.A., Markova O.L. On the issue of air emissions control for sewage sludge incinerators: a short review *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya — ZNiSO*. 2022; (5): 15–22. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-5-15-22> (in Russian)
6. Noskov S.N., Markova O.L., Ganichev P.A., Eremin G.B. Analysis of the legal regulation of atmospheric air pollution at the sites for the placement of sludge from sewage treatment plants when establishing a sanitary protection zone according to the olfactory criterion of impact. In: *Topical Issues of Hygiene: Collection of Scientific Papers of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, Dedicated to the 90th Anniversary of Z.D.S. RF, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor G.V. Selyuzhitsky [Aktual'nye voprosy gigieny: Sbornik nauchnykh trudov VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 90-letiyu z.d.n. RF, akademika RAEN, professora G.V. Selyuzhitskogo]*. St. Petersburg; 2022: 203–10. (in Russian)
7. Noskov S.N., Markova O.L., Eremin G.B., Zaritskaya E.V., Isaev D.S. Quantitative and qualitative determination of gases generated on sludge sites of sewage treatment plants. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya — ZNiSO*. 2022; 30(7): 40–7. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-7-40-47> (in Russian)
8. Magomedov Kh.K., Belkin A.S., Noskov S.N., Fridman K.B. Experimental substantiation of the hygienic assessment method of the geotubing of deposits from urban sewage treatment facilities. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2017; 96(7): 623–6. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-7-623-626>
9. Zavadovskaya E.V. *Development of technology for the preparation of dehydrated sewage sludge from sewage treatment plants for extended disposal*. Diss. Moscow; 2009. (in Russian)
10. Knoer P., Byukhler M., Puasson A., Chepurnov A.V. Low-temperature two-stage wastewater sludge drying. *Vodospobzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2012; (4): 7a–11. (in Russian)
11. Judex J.W., Gaiffi M., Burghbacher H.C. Gasification of dried sewage sludge: Status of the demonstration and the pilot plant. *Waste Managt.* 2012; 32(4): 719–23. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.12.023>
12. Harrad S.J., Jones K.C. A source inventory and budget for chlorinated dioxins and furans in the United Kingdom environment. *Sci. Total Environ.* 1992; 126(1–2): 89–107. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90486-c](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90486-c)
13. Kao A.S., Venkataraman C. Estimating the contribution of re-entrainment to the atmospheric deposition of dioxin. *Chemosphere*. 1995; 31(10): 4317–31
14. Warren T.K., Mitchell K.A., Lawrence B.P. Exposure to 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) suppresses the humoral and cell-mediated immune responses to influenza A virus without affecting cytolytic activity in the lung. *Toxicol. Sci.* 2000; 56(1): 114–23. <https://doi.org/10.1093/toxsci/56.1.114>
15. Duarte-Davidson R., Sewart A.P., Alcock R.E., Cousins I.T., Jones K.C. Exploring the balance between sources, deposition, and the environmental burden of PCDD/Fs in the U.K. Terrestrial Environment: An aid to identifying uncertainties and research needs. *Environ. Sci. Technol.* 1997; 31(1): 1–11.
16. Fiedler H. EPA dioxin-reassessment: implications for Germany. *Organohalogen Compounds*. 1995; 22: 209–28.
17. Schecter A.J. 2, 3, 7, 8-Chlorine substituted dioxin and dibenzofuran congeners in 2, 4-D, 2, 4, 5-T and pentachlorophenol. *Organohalogen Compounds*. 1997; 32: 51–5.
18. Smith R.M., O'Keefe P.W., Hilker D., Connor S., Posner E. Direct and indirect contribution of atmospheric PCDDs and PCDFs to Hudson River National Estuarine Research Reserve sediment cores. *Organohalogen Compounds*. 1995; 24: 141–5.