ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК [556.388:628.4](470.26) doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-558-574

Изменчивость химических показателей фильтрационных вод полигона твердых коммунальных отходов в пос. им. А. Космодемьянского Калининградской области

А.В. Минашкина, С.В. Кондратенко

Калининградский государственный технический университет, Калининград, quizas93@mail.ru

В статье приведены результаты исследования химического состава фильтрационных вод полигона твердых коммунальных отходов. Анализ проб фильтрата, отобранных из дренажной емкости полигона, показывает, что концентрации различных веществ в свалочном фильтрате значительно изменяются даже в течение короткого промежутка времени. Исследования фильтрата проведены по 46 показателям, больше половины из них превышали ПДК. Предложена гипотеза о гидрологической связи ближайших к полигону грунтовых и поверхностных вод с самим телом полигона.

Ключевые слова: мониторинг, полигон, фильтрат, показатели, химический анализ, рекультивация.

Variability of chemical indicators of filtration waters of the municipal solid waste landfill in the village them. A. Kosmodemyanskiy Kaliningrad region

A.V. Minashkina, S.V. Kondratenko

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

The article presents the results of studying the chemical composition of seepage waters of a solid waste landfill. Their special feature is a complex and heterogeneous chemical composition, therefore requiring a long—term study of the composition of leachate. For a complete analysis, archival data was collected from the period before and during the reclamation of the landfill. The authors of the article conducted studies of the chemical composition of the leachate after the reclamation of the landfill. The archived data includes the period of 2008—2009, which is the period of the landfill operation. The second period of 2018—2021 is the period of reclamation works at the landfill and post—reclamation. Analysis of the leachate samples taken from the landfill drainage tank shows that the concentrations of various substances in the landfill leachate vary significantly, even over a short period of time. Leachate studies were conducted on 46 indicators, with more than half of them exceeding the MPC. The highest excesses were noted for such substances as BOD5, COD, ammonium nitrogen, chlorides, solid residue, and suspended solids. The obtained data were compared with the results of studies of other polygons. The features of the geological structure of the landfill and its location are described. The dependence of the volume of the resulting leachate on the water level in the Pregola River and the Kaliningrad Bay is presented. The article proposes a hypothesis about the hydrological connection of the ground and surface waters closest to the polygon with the polygon body itself. This hypothesis is supported by the first results of the observation of the water level regime in the Kaliningrad Bay and the volumes of leachate pumped from the storage tank. The composition of the leachate depends primarily on the chemical composition of the waste entering the landfill. Until recently, Russian landfills received both solid municipal waste and industrial waste. The high content of organic decomposition products, potassium, magnesium and sodium in the leachate of the Kaliningrad landfill seems to be caused by the fact that the food industry, primarily the fish processing industry, existed and continues to develop in the region.

Keywords: monitoring, landfill, filtrate, indicators, chemical analysis, reclamation.

For citation: *A.V. Minashkina, S.V. Kondratenko.* Variability of chemical indicators of filtration waters of the municipal solid waste landfill in the village them. A. Kosmodemyanskiy Kaliningrad region. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 64: 558—574. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-558-574.

Введение

По плану федерального проекта «Снижение негативного воздействия на окружающую среду путем ликвидации наиболее опасных объектов накопленного вреда окружающей среде и несанкционированных свалок в границах городов» к 2024 г. предполагается ликвидировать 191 несанкционированную свалку [1]. Одной из таких свалок оказался полигон для захоронения твердых коммунальных отходов (ТКО), который находился в черте г. Калининград (рис. 1). В начале 2019 г. в рамках национального проекта «Чистая страна» закончилась рекультивация этого полигона. Это был первый случай успешной рекультивации крупной свалки в Северо-Западном федеральном округе.

Более подробная информация об истории возникновения свалки и других аспектах ее эксплуатации приведена в статье, опубликованной в журнале «Гидрометеорология и экология» [2].

Поскольку история возникновения и использование калининградского полигона, вероятно, во многом похожа на историю уже рекультивированных и готовящихся к рекультивации свалок, опыт решения вопросов по мониторингу состава свалочного фильтрата и решению проблемы его очистки в нашем случае будет полезен и в других регионах России.

В вышеупомянутой статье по организации мониторинга свалочного фильтрата и водных объектов, располагающихся вблизи с рекультивированной свалкой, мы привели обзор российских нормативных документов, определяющих проведение этой процедуры. И здесь необходимо упомянуть, что 31 декабря 2020 г.

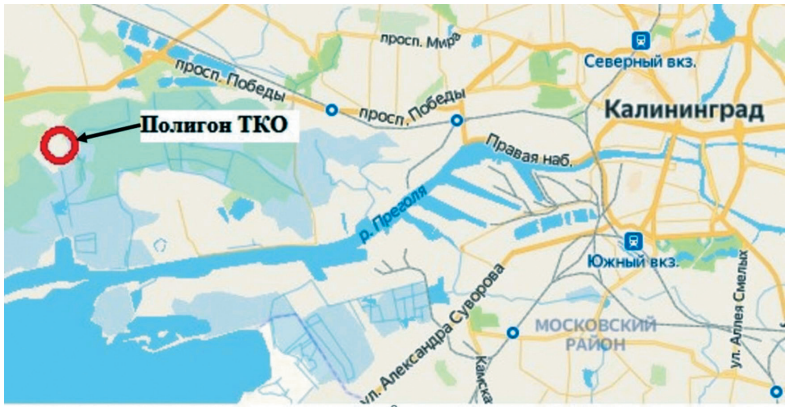

Рис. 1. Расположение рекультивированного полигона твердых коммунальных отходов в Калининградской области.

Fig. 1. Location of the reclaimed municipal solid waste landfill in the Kaliningrad region.

Правительство РФ приняло постановление № 2398 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий», которое отнесло объекты размещения отходов производства и размещения после рекультивации к объектам III категории (объекты, оказывающие незначительное негативное воздействие на окружающую среду — НВОС). Соответственно, теперь рекультивированный полигон необходимо ставить на учет как источник НВОС, готовить для него программу производственного экологического контроля (а в его составе — программу экологического мониторинга), отчитываться по результатам мониторинга и по его показателям рассчитывать платежи за НВОС. Ранее таких конкретных требований к рекультивированным свалкам не предъявляли, поскольку считали их рекультивированными земельными участками.

В связи с этим остро встал вопрос по достоверной оценке объемов поступающих в окружающую среду с фильтратом загрязняющих веществ и возможностью их снижения. В калининградском случае рассматривали два варианта очистки фильтрата: строительство локальных очистных сооружений и прокладка трубопровода от накопительной емкости до приемной камеры городского коллектора.

Строительство локальных очистных сооружений, по оценке экспертов, могло составить около 50 млн рублей с дальнейшими эксплуатационными расходами, подготовкой разрешительных документов на сброс очищенных сточных вод и т.д. Кроме того, сложно было спрогнозировать изменение со временем объемов образующего фильтрата. Поэтому был выбран второй вариант — фильтрат по коллектору направляется на городские очистные сооружения. Но в этом случае управляющая полигоном компания вынуждена платить калининградскому водоканалу значительные суммы за сбрасываемые с фильтратом загрязняющие вещества.

Однако значения одних и тех же параметров в протоколах химического анализа фильтрата как до, так и после рекультивации варьировали в очень широком диапазоне. В некоторых литературных материалах значения показателей фильтрата также представлены в виде широкого диапазона [11, 14], а в некоторых [12] — приводятся только средние значения без упоминания того, сколько было проведено анализов и с чем могли быть связаны изменения показателей фильтрата.

Поэтому для получения предварительных сведений о степени изменчивости показателей фильтрата была поставлена задача сбора по возможности всех протоколов по его анализу, которые были подготовлены аккредитованными лабораториями, и дополнением их результатами регулярных исследований, выполненных университетской лабораторией КГТУ.

Целью данной работы является исследование динамики некоторых химических показателей фильтрата полигона твердых коммунальных отходов (ТКО) в пос. Космодемьянского Калининградской области в 2008—2021 гг.

Материалы и методы исследований

Сбор, обработка и анализ данных по составу фильтрата полигона ТКО в пос. им. А. Космодемьянского Калининградской области проводился по двум направлениям.

1. Сбор протоколов химического анализа фильтрата, подготовленных аккредитованными лабораториями. Причем, протоколы были разделены на две группы — полученные в 2008—2009 гг. (табл. 1) и в 2018—2021 гг. (табл. 2).

В первом случае было собрано только три протокола по фильтрату, пробы которого отбирались в обводной канаве и обрабатывались лабораторией ЦЛАТИ каждый раз по разному набору параметров (всего их было 27) в зимне-летний период. В таблице по каждому параметру приводится количество его измерений, среднее значение, максимальное и минимальное. В двух последних столбцах приведены ПДК соответствующего параметра для хозяйственно-питьевых и рыбохозяйственных водоемов.

Рис.2. Место обора проб на полигоне твердых коммунальных отходов в Калининградской области.

Fig. 2. Sampling site at the municipal solid waste landfill in the Kaliningrad region.

Для второй группы были собраны 16 протоколов анализа фильтрата, полученных в период рекультивационных и пострекультивационных работ и обработанных пятью аккредитованными лабораториями, как государственными, так и негосударственными. В данном случае общий список исследованных параметров составил 46. Среднее значение по ним определялось только по абсолютным значениям протоколов, поскольку по некоторым параметрам в протоколах приводились их относительные значения, связанные с ограничениями используемых методик. Для этого в столбце «Примечание» указывается число таких измерений и лимитирующее значение.

2. Исследование химического состава фильтрата силами экологической лаборатории Калининградского государственного технического университета (табл. 3). Отбор проб фильтрата и его анализ были проведены ежемесячно с октября 2019 г. по март 2021 г. (за исключением апреля, июня, ноября и января 2021 г. в виду сложной эпидемиологической ситуации). Гидрохимический анализ проводился в соответствии с общепринятыми методиками в лаборатории гидрохимических исследований КГТУ. Применялись спектрофотометрические, титриметрические и гравиметрические методы исследования. Анализ проводился по следующим показателям: перманганатная окисляемость, *pH*, углекислый газ, бикарбонаты, кальций, магний, жесткость общая, аммоний-ион, нитриты, общий фосфор, фосфат-ион, железо (общее), нитраты, хлориды, сульфаты, щелочность, взвешенные вещества, сухой остаток.

Место отбора проб на полигоне показано на рис. 2.

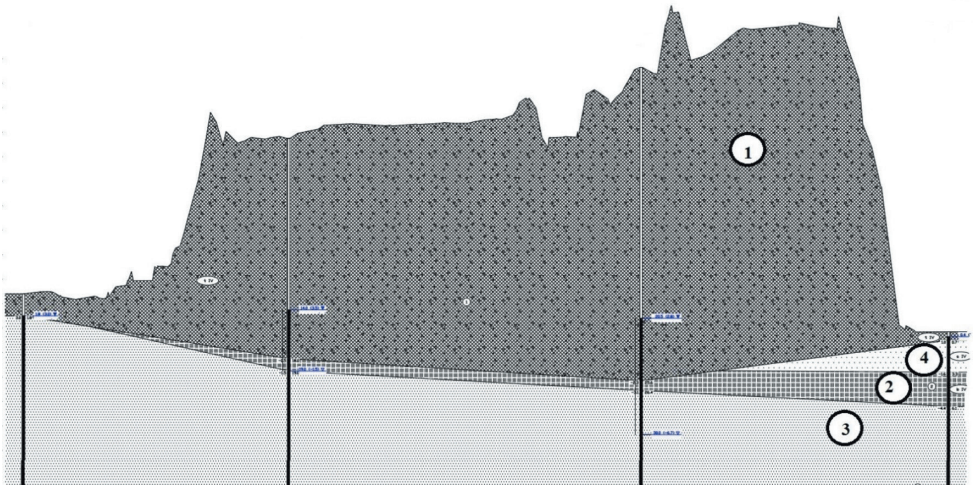

Рис. 3. Форма свалки до рекультивации (правая сторона направлена в сторону Калининградского залива) и структура грунтов под ней:

1 — насыпные грунты: свалка бытовая; *2* — торф среднеразложившийся коричневый насыщенный водой; *3* — пески мелкие средней плотности темно-серые насыщенные водой; *4* — пески средней крупности средней плотности, серые насыщенные водой с гравием.

Fig. 3. The shape of the landfill before reclamation (the right side is directed towards the Kaliningrad Bay) and the structure of the soil under it:

1 — bulk soils: household landfill; *2* — medium-decomposed brown peat saturated with water; *3* — small medium-density dark gray sands saturated with water; *4* — medium-sized medium-density sands, gray saturated with water with gravel.

При проведении инженерно-геологических изысканий на свалке, представленных в техническом отчете по инженерно-геологическим изысканиям для разработки проектной документации по объекту: «Рекультивация городского полигона ТКО, расположенного в пос. им. А. Космодемьянского г. Калининграда» опубликованном в 2015 г., было установлено, что техногенные отложения представлены насыпными грунтами (бытовыми отходами). Вскрытая мощность отложений составляла от 0,7 до 30,0 м, их подошва пересечена на глубинах от 0,7 до 30,0 м, абсолютные отметки от –2,3 до 3,0 м (рис. 3).

Биогенные отложения представлены торфом среднеразложившимся, коричневым, насыщенным водой. Вскрытая мощность отложений составляла от 0,8 до 3,5 м, их подошва пересечена на глубинах от 3,3 до 32,0 м, абсолютные отметки от –4,8 до 0,8 м.

Аллювиальные отложения представлены песками мелкими, средней плотности, темно-серыми, насыщенными водой и песками средней крупности, средней плотности, серыми, насыщенными водой с гравием. Вскрытая мощность отложений составляет от 0,5 до 3,2 м, их подошва пересечена на глубинах от 0,7 до 4,0 м, абсолютные отметки от –1,6 до 3,5 м. Вскрытая мощность песков составляет от

13,0 до 43,2 м, отложения пройдены до глубин от 20,0 до 45,0 м до абсолютных отметок от –14,2 до –40,2 м.

Результаты исследований

Результаты исследования фильтрата по химическим показателям представлены в таблицах 1, 2, 3. В данных таблицах приводятся значения исследуемых веществ и сопоставление полученных данных с ПДК для рыбохозяйственных водоемов и водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

Таблица 1

Результаты исследования фильтрата полигона
твердых коммунальных отходов по химическим показателям в 2008—2009 гг.
(для БПК5 и ХПК единица измерения — мгO_2/дм^3,
для общей жесткости — мг экв/дм^3, для остальных показателей — мг/дм^3)

Results of the study of the leachate of the MSW landfill by chemical indicators
in 2008—2009 (for BOD5 and COD the unit of measurement is mgO_2/dm^3,
for total hardness — mg eq/dm^3, for other indicators — mg/dm^3)

№ п/п	Наименование вещества	Количество результатов	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение	ПДК*	ПДК**
1	БПК5	3	1583	4400	123	4,0	2,1
2	ХПК	2	3210	5400	1020	30,0	—
3	Азот общий	1		36		—	—
4	Аммоний-ион	2	505	640	370	1,5	0,5
5	Азот аммонийный	2	395	500	370	—	0,4
6	Нитрат-ион	2	2,655	4,87	0,44	45,0	—
7	Азот нитратный	2	1,15	1,1	0,1	—	—
8	Нитрит-ион	1		1,02		3,0	—
9	Азот нитритный	1		0,31		—	—
10	Фосфор общий	1		0,46		—	—
11	Фосфат-ион	3	1,18	1,80	0,6	—	0,15
12	Фосфор фосфатный	3	0,38	0,38	0,19	—	—
13	Сульфаты	1		159		500,0	100
14	Хлориды	1		281		350,0	300
15	Железо	1		12,7		0,3	0,1
16	Марганец	2	0,665	1,05	0,28	0,1	0,01
17	Медь	1		0,021		1,0	0,001
18	Цинк	2	0,633	1,24	0,026	5,0	0,01
19	Никель	1		0,005		0,02	0,01
20	Кадмий	1		0,0003		0,001	0,005
21	Свинец	1		0,002		0,01	0,006
22	Кальций	1		120		—	180
23	Магний	1		33		50	40
24	Натрий	1		44		200,0	120

Окончание табл. 1

№ п/п	Наименование вещества	Количество результатов	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение	ПДК*	ПДК**
25	Гидрокарбонаты	1	390			—	—
26	Жесткость общая	1	8,7			10,0	—
27	Калий	1	58			—	50

ПДК* — из-за отсутствия нормативных значений непосредственно для объекта измерений, в качестве справочных приведены значения ПДК согласно СанПин 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

ПДК** — из-за отсутствия нормативных значений непосредственно для объекта измерений, в качестве справочных приведены значения ПДК согласно Приказу № 552 от 13 декабря 2016 г. «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

Данные пояснения также применимы к таблицам 2 и 3.

Как видно из табл. 1, 11 показателей из 27 превышали ПДК. В 2008—2009 гг. полигон еще активно использовался, и захоронение отходов на нем было разрешено. Превышение некоторых показателей в данном случае является нормальным для сточных вод подобного рода объектов.

Для дорекультивационного периода (табл. 1) в фильтрате наблюдались высокие показатели тех параметров, которые характеризуют результаты активного разрушения в свалке органических соединений: БПК5, ХПК, соединения азота и фосфора. Превышение ПДК по таким веществам, как железо, марганец, медь, цинк и калий, можно объяснить тем, что эти металлы активно использовались в предыдущие годы как в быту, так и на производстве [3].

Далее мы сравнили данные результатов аккредитованных лабораторий в период с 2018 по 2021 г. Этот период захватывает этапы рекультивации и пострекультивации, когда фильтрат выделяется на завершающих этапах жизненного цикла полигона и часть показателей должна снизиться, а такие, как *pH* и хлориды, наоборот, возрасти. Это связано с уменьшением содержания органики, но повышением доли трудно окисляемых соединений (ПАВ, гуматы металлов, гуминовые соединения) [4].

В фильтрате, исследованном в аккредитованных лабораториях, отобранном в период рекультивации и после нее (табл. 2), также наблюдаются высокие значения показателей, свидетельствующие об активном разложении органики. Данные представлены в табл. 2.

Но к традиционно высоким концентрациям железа, марганца, меди, цинка и калия добавились из нормируемых показателей взвешенные вещества, нефтепродукты, фенолы, сульфиды, сульфаты, хлориды, алюминий, хром, никель, свинец, мышьяк, ртуть, СПАВы (синтетические поверхностно-активные вещества) анионные, магний, натрий, стронций, литий и олово. Однако, как видно из колонки минимальных значений, в ряде случаев минимальные концентрации некоторых веществ оказываются ниже значений ПДК.

Таблица 2

Результаты исследования фильтрата полигона
твердых коммунальных отходов по химическим показателям в период с 2018—2021 гг.
(для БПК5 и ХПК единица измерения — мгO_2/дм^3,
для общей жесткости — мг экв/дм^3, для остальных показателей — мг/дм^3)

Results of the study of the leachate of the municipal solid waste landfill by chemical indicators in the period from 2018—2021 (for BOD5 and COD, the unit of measurement is mgO_2/dm^3, for total hardness — mg eq/dm^3, for other indicators — mg/dm^3)

№ п/п	Наименование вещества (показателя)	Количество результатов	Среднее	Максимальное	Минимальное	Примечание	ПДК хозяйственно-питьевых водоемов*	ПДК рыбохозяйственного значения**
1	Взвешенные вещества	12	56,9***	129,3***	5,3***		0,25	0,75
2	БПК(полное)	7	241,5***	456,6***	53***		—	3
3	БПК5	12	106,8***	250***	27,2***		4,0	2,1
4	ХПК	14	63,4***	155,4***	6,6***		30,0	—
5	Азот общий	9	730,4±8,1	1676	77		—	—
6	Аммоний-ион	14	601,1***	1435,3***	34,8***	3: более 40	1,5	0,5
7	Нитрат-ион	9	0,5***	1,4***	0,04***	2: менее 0,2	45,0	—
8	Нитрит-ион	9	0,5***	1,4***	0,1***	3: менее 0,2	3,0	—
9	Фосфор общий	7	12,3±1,7	40,1	0,1		—	—
10	Фосфат-ион	11	172,6***	666,6***	7,3***		—	0,15
11	Нефтепродукты	16	15,7***	118***	0,08***		0,1	0,05
12	Фенолы (сумма)	13	119***	520***	1***		0,001	—
13	Сульфиды (S-H_2S+S_2-)	5	4,6***	6,66***	3,4***	2: менее 0,0002	0,05	—
14	Сульфаты	16	1,3***	1,6***	0,1***		500,0	100
15	Хлориды	16	3,2***	11,1***	0,2***		350,0	300
16	Алюминий	4	2,9***	6,5***	1,5***		0,2	0,04
17	Железо	16	30,3***	90,3***	6***		0,3	0,1
18	Марганец	8	28***	56***	13***		0,1	0,01
19	Медь	13	42***	69***	6***	1: менее 0,0006	1,0	0,001
20	Цинк	12	9***	36***	0,5***		5,0	0,01
21	Хром общий	6	10,2***	21,4***	0,2***		0,05	—
22	Хром (+3)	3	7,4***	21,1***	0,1***		—	0,07
23	Хром (+6)	7	9***	28,5***	0,5***	2: менее 0,01	—	0,02
24	Никель	11	16***	34***	6***	1: менее 0,005	0,02	0,01
25	Кадмий	11	1***	1***	0,1***	3: менее 0,0005	0,001	0,005

Окончание табл. 2

№ п/п	Наименование вещества (показателя)	Количество результатов	Среднее	Максимальное	Минимальное	Примечание	ПДК хозяйственно-питьевых водоемов*	ПДК рыбохозяйственного значения**
26	Свинец	13	3,6***	10***	0,3***	2: менее 0,0002	0,01	0,006
27	Мышьяк	8	3***	6***	1***	2: менее 0,002	0,01	0,05
28	Ртуть	4	1951***	7700***	4***		0,0005	0,00001
29	Жиры	5	8,9±1,7	13	4,6		—	—
30	СПАВ неионогенные	5	9,2±1,3	21,6	1,2	1: менее 0,5	—	—
31	СПАВ анионные	10	9***	36***	3***		0,5	0,1
32	Кальций	9	0,8***	1,09***	0,3***		—	180
33	Магний	9	1,59***	3,3***	1,01***		50	40
34	Натрий	7	8,9***	13,3***	7,2***		200,0	120
35	Сухой остаток	8	4,4***	7,4***	2,8***		1500	—
36	Фторид-ион	3	0,2***	0,4***	0,06***	1: менее 0,1	1,5	—
37	Стронций	5	9,5***	43,2***	0,5***		7,0	0,4
38	Сероводород	2	72***	—	—	1: менее 0,002	0,05	—
39	Литий	2	4,6***	5,6***	4***		0,03	0,08
40	Гидрокарбонаты	5	3477,3±69,5	5551	1068	1: более 6100	—	—
41	Жесткость общая	1	1,5***				10,0	—
42	Карбонаты	2	150±75			1: менее 6	—	—
43	Калий	5	28,9***	46,2***	11,7***	3: более 100	—	50
44	Формальдегид	1	0,4***				0,05	0,1
45	Молибден	1	5***				0,07	0,001
46	Олово	1	1,3***				2,0	0,112

ПДК*** — значения выражены в единицах кратности наиболее жесткого ПДК.

Из 46 показателей, представленных в табл. 2, 35 превышают ПДК. Такое увеличение количества веществ с показателями, превышающими значения ПДК, скорее всего, связано с последствиями рекультивационных работ, во время которых происходило активное перемещение и перемешивание свалочных масс. А в нашем случае это сопровождалось поступлением в них большого объема влаги. Рекультивация активизировала окислительно-восстановительные процессы с дальнейшим вымыванием в фильтрат их продуктов.

В табл. 3 представлены результаты исследования фильтрационных вод в лаборатории КГТУ.

Таблица 3

Результаты исследования фильтрата полигона твердых коммунальных отходов по химическим показателям в период с 2019—2021 гг. (для общей жесткости единица измерения — мг экв/дм^3, для остальных показателей — мг/дм^3)

The results of the study of the leachate of the municipal solid waste landfill by chemical indicators in the period from 2019—2021 (for total hardness the unit of measurement — mg eq/dm^3, for other indicators — mg/dm^3)

№ п/п	Наименование вещества (показателя)	Количество результатов	Среднее	Максимальное	Минимальное	ПДК хозяйственно-питьевых водоемов*	ПДК рыбохозяйственного значения**
1	Перманганатная окисляемость	14	77,9***	157,5***	25,7***	7,0	—
2	Аммоний-ион	14	128,3***	162,2***	91,04***	1,5	0,5
3	Нитрит-ион	14	0,09***	0,18***	0,03***	3,0	—
4	Нитрат-ион	14	0,3***	1,2***	0,02***	45,0	—
5	Фосфор общий	14	4,96±0,3	8,84	0,03	—	—
6	Фосфат-ион	14	1329,2***	2006,1***	493***	—	0,15
7	Железо (общее)	14	510,4***	1061***	249,4***	0,3	0,1
8	Углекислый газ	14	19,41±1,3	168,67	0,35	—	—
9	Хлориды	14	3,6***	4,9***	1,8***	350,0	300
10	Сульфаты	4	5,6***	9,02***	1,8***	500,0	100
11	Щелочность	14	87,34±6,2	120	9,15	—	—
12	Гидрокарбонаты	14	5327,5±38,5	7320	558,27	—	—
13	Жесткость общая	5	1,5***	2,8***	0,16***	10,0	—
14	Кальций	12	0,25***	0,7***	0,07***	—	180
15	Магний	4	2,8***	5,79***	0,24***	50	40
16	Взвешенные вещества	14	724,9***	4640***	56***	0,25	0,75
17	Сухой остаток	14	3,1***	4,5***	0,3***	1500	—
18	pH (ед)	11	7,80±0,7	8,70	7,31	6,0—9,0	7,0—8,5

Как видно из табл. 3, показатели по перманганатной окисляемости, аммонийному азоту, нитратам, общему железу, хлоридам, сульфатам, общей жесткости, кальцию, магнию, взвешенным веществам и сухому остатку превышают ПДК объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, а также рыбохозяйственного значения. Это может быть связано с присутствием в фильтрате биогенных веществ, изменение концентраций которых может коррелировать с изменением количества выпадения осадков.

Проседание свалочных масс внутри полигона ТКО образование и выход свалочного биогаза может влиять на изменение тех или иных показателей концентрации. Повышение концентраций аммонийного азота обычно указывают на свежее загрязнение, что может свидетельствовать об изменяющихся процессах внутри полигона ТКО после рекультивации.

Аммонийный азот составляет обычно 90 % от общего содержания азота (более 1 г/л). В дополнение к его эвтрофикационному эффекту аммонийный азот

является потребителем кислорода и становится токсичным, когда устанавливается его химическое равновесие с аммиаком. Содержание аммонийного азота в фильтрате различных полигонов неодинаково и может быть высоким [5, 6].

Весьма высоким может быть также содержание железа в фильтрате.

Повышенные концентрации хлоридов в фильтрационных водах полигонов объясняются захоронением на таких полигонах отходов рыбоперерабатывающих заводов [8]. Высокое содержание хлоридов также может быть связано с захоронениями на полигоне отходов животного происхождения [9].

Согласно [10], концентрация хлоридов может колебаться в пределах 200—3000 мг/дм^3 в фильтрационных водах полигона 1—2 лет после рекультивации, а концентрация снижается до 100—400 мг/дм^3 для полигонов старше 5—10 лет после рекультивации [10].

Сульфаты в фильтрационных водах появляются в результате разложения органических веществ, растворимых отходов, таких как строительные отходы или зола, синтетических моющих средств и инертных отходов (дноуглубительные речные отложения).

Расхождение данных в таблицах 2 и 3 по таким показателям как взвешенные вещества, аммоний-ион, нитраты, кальций, магний, фосфат-ион, сульфаты, железо (общее) объясняется тем, что данные табл. 2 захватывают период рекультивационных работ, который предполагает перемешивание, перемещение и уплотнение свалочных масс. В период пострекультивации (табл. 3) в теле полигона происходит проседание свалочных масс, перемешивание фильтрационных вод и выдавливание их в накопительную емкость, что сказывается на составе фильтрационных вод полигона. В зависимости, от определенной фазы биодеструкции ТКО [11] изменяется химический состав фильтрата. Данные табл. 2 захватывают фазу ацетогенеза, характеризующуюся распадом быстро- и среднеразлагаемых фракций ТКО, основными продуктами которого являются уксусная и пропионовая кислоты, углекислый газ и вода, приводящие к ускорению процессов деструкции, гидролиза древесины, целлюлозы, некоторых видов пластмасс, синтетических волокон.

Значения табл. 3 представляют стадию активного метаногенеза, так как соотношение БПК$_5$/ХПК [11] в исследуемом фильтрате составляет 0,2 на период 2021 г. На данной стадии биодеструкции протекает ферментативное разложение образованных в ацетогенной фазе кислот, которое сопровождается значительным выделением газов (метан, углекислый газ, меркаптаны, аммиак и др.) и повышением *pH* среды (7,2—8,6). На этой стадии происходит разложение 50—70 % целлюлозы и гемицеллюлозы с образованием биогаза и соединений гумусовой природы, полифенолов и др.

Полученные нами результаты можно сравнить со средними значениями показателей фильтрата, приведенных в «Рекомендациях по сбору, очистке и отведению сточных вод полигонов захоронения твердых бытовых отходов» (табл. 4).

Другими данными для сравнения были результаты химического анализа природных вод, отобранных на территории действующей свалки в Ленинградской области (табл. 5).

Таблица 4

Химический состав фильтрационных вод полигона (мг/дм^3) [11]

Chemical composition of filtration waters of the landfill (mg/dm^3) [11]

Показатель	Среднее значение	Диапазон концентраций
Натрий	1350	50—4000
Калий	1100	10—2500
Нитрат-ион	3	0,1—50
Нитрит-ион	0,5	0—25
Азот общий	1250	50—5000
Фосфор общий	6	0,1—30
Мышьяк	0,16	0,005—1,6
Свинец	0,09	0,008—1,02
Кобальт	0,055	0,0005—0,14
Кадмий	0,006	0,004—0,95
Никель	0,2	0,02—2,05
Хром	0,3	0,03—1,6
Медь	0,08	0,004—1,4
Ртуть	0,01	0,0002—0,05
Фенол	0,0052	0,01—15,0
Хлорорганические соединения	0,02	0,01—0,15

Таблица 5

Химический состав природных вод на территории полигона
твердых коммунальных отходов, подлежащего рекультивации [12]

The chemical composition of natural waters on the territory
of the municipal solid waste landfill subject to reclamation [12]

Показатель	Дренажная канава ниже полигона	Смотровая скважина
pH	7,60	7,62
Ион аммония (NH_4) мг/дм^3	2,2	0,99
Нитрит-ион (NO_2) мг/дм^3	0,20	0,025
Нитрат-ион (NO_3) мг/дм^3	1,24	1,5
Хлориды (Cl) мг/дм^3	460,0	25,0
Сульфаты (SO_4) мг/дм^3	55,0	24,0
Железо (Fe) мг/дм^3	1,53	1,2
Кальций (Ca) мг-экв/ дм^3	5,5	3,8
Магний (Mg) мг-экв/ дм^3	5,0	4,0
Медь (Cu) мг/дм^3	0,13	0,04
БПК$_5$ мг/дм^3	6,4	2,9
ХПК мг/дм^3	34,0	29,0
Кадмий (Cd) мг/дм^3	0,007	0,001
Свинец (Pb) мг/дм^3	0,024	0,008
Ртуть (Hg) мг/дм^3	< 0,0001	< 0,0001
Мышьяк (As) мг/дм^3	0,004	0,0013

Окончание табл. 5

Показатель	Дренажная канава ниже полигона	Смотровая скважина
Сухой остаток мг/дм^3	820,0	434,0
Гидрокарбонаты мг/дм^3	570,0	490,0

Особенностью расположения полигона ТКО в пос. им. А. Космодемьянского Калининградской области является близость к Калининградскому заливу, заболоченность прилегающих территорий и, как следствие, высокий уровень грунтовых вод. Структура грунтов под полигоном, представленных на рис. 3, позволяет предположить, что у тела полигона имеется гидрологическая связь с грунтовыми водами и через них с поверхностными водами. Другой особенностью является то, что в Калининградском заливе может значительно изменяться уровень воды в зависимости от направления ветра: во время нагонных ветров уровень воды в заливе и во впадающей в него реке Преголе может повышаться на 1 м и более. И этим, возможно, объясняется высокая вариабельность показателей фильтрата и объемов откачиваемой из накопительной емкости фильтрата [13]. Эта гипотеза пока находится в стадии дополнительного изучения, но первые результаты, предоставленные организацией МБУ «Чистота», в ведении которой находится полигон (рис. 4), свидетельствуют о большой корреляции этих показателей.

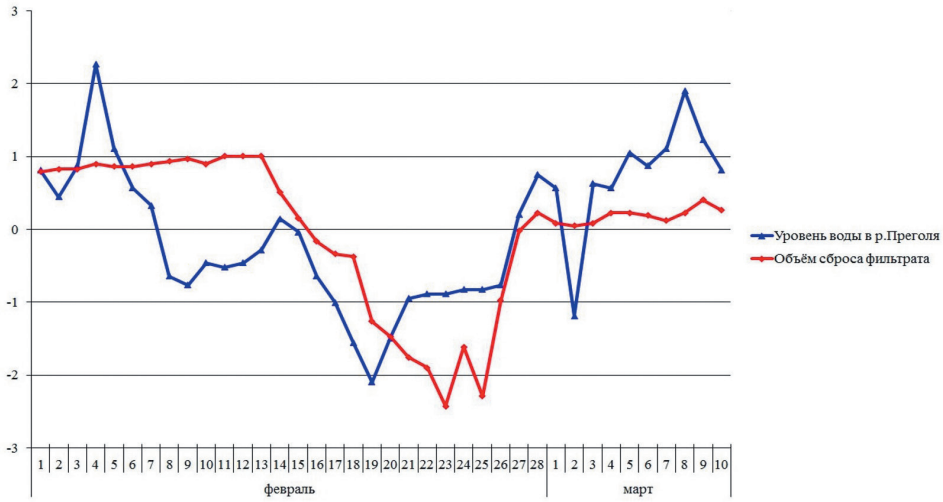

Рис. 4. Изменчивость уровня р. Преголи
и объемов откачиваемой воды с полигона в феврале—марте 2021 г.

Fig. 4. Dynamics of the level of r. Pregoli
and volumes of pumped water from the landfill in February—March 2021.

Для сравнения динамики объема сброса фильтрата и уровня воды в р. Преголи использовались их стандартизированные переменные в виде:

$$Z = \frac{(X - \mu)}{\sigma},$$

где μ — среднее арифметическое; σ — стандартное отклонение.

Выводы

1. Результаты исследования аккредитованными лабораториями химического состава фильтрата полигона ТКО свидетельствуют о том, что до рекультивации и после нее в фильтрате были высокими (превышающими ПДК) значения показателей, связанных с активным разложением органики, и концентрации железа, марганца, меди, цинка и калия. После рекультивации к этим показателям добавились взвешенные вещества, нефтепродукты, фенолы, сульфиды, сульфаты, хлориды, алюминий, хром, никель, свинец, мышьяк, ртуть, СПАВы анионные, магний, натрий, стронций, литий и олово. Из них самые высокие значения, у которых даже минимальные показатели превышали хотя бы один из видов ПДК (для хозяйственно-питьевых или рыбохозяйственных водоемов), наблюдались у взвешенных веществ, БПК(полн.), БПК5, ХПК, фосфат-иона, сульфидов, алюминия, железа, марганца, меди, никеля, ртути, СПАВ анионных, магния, натрия, сухого остатка, лития, калия и олова. Но при этом надо учитывать и то, что по сульфидам, ртути, литию, калию и олову было проведено от 1 до 5 определений. В университетской лаборатории стабильно высокие значения в течение 14 месяцев наблюдались у перманганатной окисляемости, иона аммония, фосфат-иона, хлоридов и взвешенных веществ.

2. Значения большинства показателей химического состава свалочного фильтрата рекультивированного полигона в пос. им. А. Космодемьянского в период исследований изменялись в очень широком диапазоне. Такая же закономерность отмечалась в литературе и по фильтрату действующих полигонов. Это объясняется большим числом сложных химических процессов, происходящих в свалочных массах, и многочисленными факторами, влияющими на них. В связи с этим разовые анализы фильтрата могут привести к ошибочным решениям по его опасности (безопасности), выбору систем очистки или по расчету платежей за сброс загрязняющих веществ.

3. Состав свалочного фильтрата зависит, в первую очередь, от химического состава отходов, поступающих на полигон ТКО. До последнего времени на российские полигоны поступали как твердые коммунальные отходы, так и промышленные. Вероятно, высокое содержание в фильтрате калининградского полигона продуктов распада органики, калия, магния и натрия связано с тем, что в области существовала и продолжает развиваться пищевая, и в первую очередь рыбоперерабатывающая, промышленность.

4. Первые результаты совместного наблюдения за уровенным режимом воды в Калининградском заливе и объемами откачиваемого из накопительной емкости фильтрата свидетельствуют в пользу гипотезы о гидрологической связи ближайших к полигону грунтовых и поверхностных вод с самим телом полигона. Для

подтверждения или опровержения этой гипотезы, предполагается продолжить наблюдения за режимом уровня воды в р. Преголи и объемом накапливаемого в емкости фильтрата. В случае подтверждения гипотезы следует рассмотреть возможность ограничения поступления воды из морского канала в мелиоративную систему земельных участков, которые примыкают к рекультивированному полигону.

Благодарности

Исследования поддержаны кафедрой ихтиологии и экологии Калининградского государственного технического университета и Программой НКО «Создание и поддержание позитивных изменений в ключевых тематических областях, связанных с водой — усиление роли НКО в Беларуси и России».

Acknowledgments

The research was supported by the Department of Ichthyology and Ecology of the Kaliningrad State Technical University and the NGO Program «Creating and maintaining positive changes in key thematic areas related to water — strengthening the role of NGOs in Belarus and Russia».

Список литературы

1. *Шахворостов Г.И., Яцкова Е.А.* Разработка предложений по совершенствованию региональной политики охраны окружающей среды (на примере Воронежской области) // Регион: системы, экономика, управление. 2020. № 4 (51). С. 62—69. doi: 10.22394/1997-4469-2020-51-4-62-69.
2. *Минашкина А.В., Кондратенко С.В., Воробьёва Е.А.* Разработка программы мониторинга водных объектов вблизи рекультивированного полигона ТКО в пос. им. А. Космодемьянского Калининградской области // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 96—112. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-96-112.
3. *Kjeldsen P., Barlaz M., Rooker A., Baun A., Ledin A., Christensen T.* Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2002. V. 32 (4). P. 297—336. doi:10.1080/10643380290813462.
4. *Mojiri A., Zhou J., Ratnaweera H., Ohashi A., Ozaki N., Kindaichi T., Asakura H.* Treatment of landfill leachate with different techniques: an overview // Journal of Water Reuse and Desalination. 2021. V. 11 (1). P. 66—96. doi:10.2166/wrd.2020.079.
5. *Wang K., Li L., Tan F., Wu D.* Treatment of Landfill Leachate Using Activated Sludge Technology: A Review // Archaea. 2018. V. 2018. P. 1—10. doi:10.1155/2018/1039453.
6. *Первов А.Г., Ширкова Т.Н., Тихонов К.В.* Расчет установок обратного осмоса и нанофильтрации, применяемых для обработки фильтратов твердых бытовых отходов // Мембраны и мембранные технологии. 2020. Т. 10, № 5. С. 309—324. doi: 10.1134/S2218117220050053.
7. *Чмыхалова С.В.* Ресурсно-экологические проблемы больших городов и пути их решения. М.: Горная книга, 2012. 328 с.
8. *Ahmed E., Maatouk M., Chafik T., Raissouni M.* Physico-chemical characterization of landfill leachates: A comparison case between Tangier and Agadir (Morocco) // Journal of Materials and Environmental Science. 2015. V. 6 (11). P. 3207—3216.
9. *Naveen B., Mahapatra D., Sitharam T., Sivapullaiah P., Ramachandra T.* Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate // Environmental Pollution. 2017. V. 220 (Part A, January). P. 1—12. doi: 10.1016/j.envpol.2016.09.002.
10. *Deng Y., Englehardt J.D.* Treatment of landfill leachate by the Fenton process // Water Research. 2006. V. 40 (20). P. 3683—3694. doi: 10.1016/j.watres.2006.08.009.

11. Рекомендации по сбору, очистке и отведению сточных вод полигонов захоронения твердых бытовых отходов. М.: ФГУП «Федеральный центр благоустройства и обращения с отходами», 2003. 49 с.
12. *Малюхин Д.М.* Экологические аспекты использования органогенных субстратов при рекультивации полигонов твердых коммунальных отходов: дисс. … канд. геогр. наук: 25.00.36. СПб., 2020. 165 с.
13. *Илларионов А.В., Лебедева А.А., Шилов Д.В.* Разработка комплексной программы системы наблюдений за состоянием окружающей среды вблизи полигона токсичных отходов «Красный Бор» // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 22. С. 211—220.
14. *Степаненко Е.Е., Поспелова О.А., Зеленская Т.Г.* Исследование химического состава фильтрационных вод полигона твердых бытовых отходов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. №1 (3). С. 525—527.

References

1. *Shahvorostov G.I., Yackova E.A.* Development of proposals for improving the regional environmental protection policy (on the example of the Voronezh region). *Region: sistemy, ekonomika, upravlenie*. Region: systems, economics, management. 2020, 4(51): 62—69. doi: 10.22394/1997-4469-2020-51-4-62-69. [In Russian].
2. *Minashkina A.V., Kondratenko S.V., Vorobyova E.A.* Development of a program for monitoring water bodies near recultivated landfill in the village named after A. Kosmodemyansky in the Kaliningrad region. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Journal of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2021. 62: 96—112. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-96-112. [In Russian].
3. *Kjeldsen P., Barlaz M., Rooker A., Baun A., Ledin A., Christensen T.* Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2002, 32 (4): 297—336. doi:10.1080/10643380290813462.
4. *Mojiri A., Zhou J., Ratnaweera H., Ohashi A., Ozaki N., Kindaichi T., Asakura H.* Treatment of landfill leachate with different techniques: an overview. Journal of Water Reuse and Desalination. 2021, 11 (1): 66—96. doi: 10.2166/wrd.2020.079.
5. *Wang K., Li L., Tan F., Wu D.* Treatment of Landfill Leachate Using Activated Sludge Technology: A Review. Archaea. 2018, 2018: 1—10. doi:10.1155/2018/1039453.
6. *Pervov, A.G., Shirkova T.N., Tihonov K.V.* Calculation of reverse osmosis and nanofiltration plants used to treat the filtrate of solid household waste. *Membrany i membrannye tekhnologii*. Membranes and membrane technologies. 2020, 10, 5: 309—324. doi: 10.1134/S2218117220050053. [In Russian].
7. *Chmyhalova S.V. Resursno-ekologicheskie problemy bol'shih gorodov i puti ih resheniya.* Resource and environmental problems of large cities and ways to solve it. Moscow: Mountain Book, 2012: 328. [In Russian].
8. *Ahmed E., Maatouk M., Chafik T., Raissouni M*. Physico-chemical characterization of landfill leachates: A comparison case between Tangier and Agadir (Morocco). Journal of Materials and Environmental Science. 2015, 6 (11): 3207—3216.
9. *Naveen B., Mahapatra D., Sitharam T., Sivapullaiah P., Ramachandra T*. Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate. Environmental Pollution. 2017, 220 (Part A, January): 1—12. doi: 10.1016/j.envpol.2016.09.002.
10. *Deng Y., Englehardt J.D*. Treatment of landfill leachate by the Fenton process. Water Research. 2006, 40(20): 3683—3694. doi: 10.1016/j.watres.2006.08.009.
11. *Rekomendaciii po sboru, ochistke i otvedeniyu stochnyh vod poligonov zahoroneniya tverdyh bytovyh othodov.* Recommendations for the collection, treatment and disposal of wastewater from landfills for solid waste disposal. Moscow: Federal State Unitary Enterprise «Federal Center for Improvement and Waste Management», 2003: 49 p. [In Russian].
12. *Malyuhin D.M. Ekologicheskie aspekty ispol'zovaniya organogennyh substratov pri rekul'tivacii poligonov tverdyh kommunal'nyh othodov*. Environmental aspects of the use of organogenic substrates in

the reclamation of municipal solid waste landfills. diss. ... candidate of geographical sciences: 25.00.36. St. Petersburg, 2020: 165 p. [In Russian].
13. *Illarionov A.V., Lebedeva A. A., Shilov D. V.* Develop schemes for integrated surveillance systems environment near the range of toxic waste «Krasny Bor». *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta.* Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2011, 22: 211—220. [In Russian].
14. *Stepanenko E.E., Pospelova O.A., Zelenskaya T.G.* Study of the chemical composition of filtration waters of the solid waste landfill. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk.* Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2009, 11, 1(3): 525—527. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 19.04.2021
Принята к публикации после доработки 25.08.2021

Сведения об авторах

Минашкина Александра Владимировна, аспирантка, 3 курс, ФГБОУ ВО «КГТУ», кафедра ихтиологии и экологии, специалист по УМР, quizas93@mail.ru.
Кондратенко Сергей Валентинович, канд. биол. наук, ФГБОУ ВО «КГТУ», kondrat@klgtu.ru.

Information about authors

Minashkina Alexandra Vladimirovna, post-graduate student, 3rd year, KSTU, Department of ichthyology and ecology, specialist in UMR, quizas93@mail.ru.
Sergey Valentinovich Kondratenko, PhD (Biol. Sci.), KSTU, kondrat@klgtu.ru.