ISSN 2712-8008
Том / Volume 25 №3 2025
Домашняя страница журнала: http://vestnik.pstu.ru/geo/
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.06
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2025

Оценка воздействия твердых отходов на окружающую среду, подземные и поверхностные воды

М.В. Висков[1,2], Я.Н. Паршакова[1], Е.Д. Кушнир[1,2], Ю.М. Маргина[1,2]

[1]Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук
(Российская Федерация, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1)
[2]Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

Assessment of the Impact of Solid Waste on the Environment, Ground and Surface Water

Mikhail V. Viskov[1,2], Ianina N. Parshakova[1], Elizaveta D. Kushnir[1,2], Iulia M. Margina[1,2]

[1]Institute of Continuous Media Mechanics, Ural branch of the Russian Academy of Sciences (13a Lenina st., Perm, 614000, Russian Federation)
[2]Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 22.11.2024. Принята / Accepted: 19.09.2025. Опубликована / Published: 24.10.2025

Ключевые слова:
полигон ТКО, фильтрат, дамба, пруд-накопитель, ПДК, химические показатели фильтрационных вод, миграция, подземные воды, загрязняющие вещества, концентрация, скважина, пробы воды, результаты химического анализа воды, грунтовый массив, полевые инженерно-геологические работы.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния объекта размещения отходов с фильтрационными и ограждающими дамбами из естественных материалов на состояние окружающей природной среды. Для детальной оценки влияния проведены исследования состояния грунтовых и поверхностных вод в месте размещения объекта. Осуществлены полевые инженерно-геологические работы. Рассматривались участки, расположенные вблизи прудов-накопителей полигона ТКО. С целью изучения физико-механических свойств грунтов и выявления основных закономерностей пространственной изменчивости их свойств осуществлялось инженерно-геологическое апробирование. Проведено бурение скважин, в процессе их проходки велось послойное описание всех встречаемых разновидностей грунтов с описанием их структурных особенностей. Отбор образцов грунтов осуществлялся по преобладающим направлениям движения грунтовых вод. Приведены показатели химического состава сточных вод объекта и химического состава грунтов, слагающих фильтрационные дамбы прудов-накопителей. На основании анализа полученных данных сделан вывод о возможности использования фильтрующих дамб для значительного снижения концентраций загрязняющих веществ, минимизации распространения загрязняющих веществ в окружающей среде. Оценена фильтрующая способность дамбы, защищающей природную среду от проникновения фильтрата полигона ТКО. По результатам проведенных исследований превышений концентраций загрязняющих веществ не выявлено. Подтверждена возможность использования фильтрационных и сорбционных характеристик дамб из естественных материалов на старых полигонах размещения твердых коммунальных отходов для предотвращения или минимизации их воздействия на окружающую среду. Данные исследования могут применяться при строительстве ограждающих сооружений объектов размещения отходов для снижения концентраций загрязняющих веществ в фильтрационных водах и предотвращения их растекания за пределы объекта.

Keywords:
solid municipal waste landfill, leachate, dam, storage pond, maximum permissible concentration, chemical indicators of leachate water, migration, groundwater, pollutants, concentration, well, water samples, results of chemical analysis of water, soil massif, field engineering and geological work.

The article presents the results of a study of the impact of a waste disposal facility with filtration and protective dams made of natural materials on the state of the surrounding natural environment. For a detailed assessment of the impact, studies of the state of ground and surface waters at the location of the facility were conducted. Field engineering and geological work was carried out. Areas located near the storage ponds of the solid municipal waste landfill were considered. Engineering and geological testing was carried out in order to study the physical and mechanical properties of soils and identify the main patterns of spatial variability of their properties. Wells were drilled, and during their drilling, a layer-by-layer description of all encountered soil types was carried out, with a description of their structural features. Soil samples were taken along the predominant directions of groundwater movement. The chemical composition of the facility's wastewater and the chemical composition of the soils that make up the filtration dams of the storage ponds are given. Based on the analysis of the data obtained, a conclusion was made about the possibility of using filter dams to significantly reduce pollutant concentrations and minimize the spread of pollutants in the environment. The filtering capacity of the dam protecting the environment from the penetration of solid municipal waste landfill filtrate was assessed. According to the results of the conducted studies, no excess concentrations of pollutants were detected. The possibility of using the filtration and sorption characteristics of dams made of natural materials at old solid municipal waste disposal sites to prevent or minimize their impact on the environment was confirmed. These studies can be used in the construction of enclosing structures for waste disposal facilities to reduce the concentrations of pollutants in filtration waters and prevent them from spreading beyond the facility.

Висков Михаил Владимирович – старший преподаватель (тел.: +007 (342) 237 84 61, e-mail: mihail.viskov@gmail.com). Контактное лицо для переписки.
Паршакова Янина Николаевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (тел.: +007 (342) 237 84 61, e-mail: parshakova@icmm.ru).
Кушнир Елизавета Дмитриевна – магистр факультета химических технологий, промышленной экологии и биотехнологий (тел.: +007 (342) 237 84 61, e-mail: kushnir.liza02@mail.ru).
Маргина Юлия Михайловна – инженер I категории (тел.: +007 (342) 237 84 61, e-mail: makarova_u85@mail.ru).

Mikhail V. Viskov (Author ID in Scopus: 6505817610) – Senior Lecturer (tel.: +007 (342) 237 84 61, e-mail: mihail.viskov@gmail.com). The contact person for correspondence.
Ianina N. Parshakova (Author ID in Scopus: 25228912400, ORCID: 0000-0002-0234-3854) – PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher (tel.: +007 (342) 237 84 61, e-mail: parshakova@icmm.ru).
Elizaveta D. Kushnir – Master of Science, Faculty of Chemical Engineering, Industrial Ecology and Biotechnology (tel.: +007 (342) 237 84 61, e-mail: kushnir.liza02@mail.ru).
Iulia M. Margina – 1st category Engineer (tel.: +007 (342) 237 84 61, e-mail: makarova_u85@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Оценка воздействия твердых отходов на окружающую среду, подземные и поверхностные воды / М.В. Висков, Я.Н. Паршакова, Е.Д. Кушнир, Ю.М. Маргина // Недропользование. – 2025. – Т.25, №3. – С. 180–187. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.3.7

Please cite this article in English as:
Viskov M.V., Parshakova Ia.N., Kushnir E.D., Margina Iu.M. Assessment of the Impact of Solid Waste on the Environment, Ground and Surface Water. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2025, vol.25, no.3, pp. 180-187. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.3.7

Введение

Согласно государственному докладу о состоянии и об охране окружающей среды в Российской Федерации [1], в 2022 г. на территории Российской Федерация образовалось 45,8674 млн т твердых коммунальных отходов (ТКО). Количество ТКО, отправленных на захоронение, составило 36,8075 млн т (80,24 %). Как видно из представленных данных, несмотря на устойчивое улучшение ситуации в области обращения с отходами [2–6], применение современных методов обработки, утилизации и обезвреживания как в Российской Федерации, так и за рубежом, процент отходов, захораниваемых на объектах размещения, остается значительным. Отходы имеют сложный многокомпонентный и неоднородный состав, зависящий от региона размещения захоронения, его культурных традиций, экономических аспектов [7–10].

Размещение отходов осуществляется на специализированных сооружениях – полигонах.

В РФ существует специфика объектов размещения отходов – некоторые из них (преимущественно старые, большой емкости объекты, существующие более 30 лет) представляют собой по сути усовершенствованные свалки, не оборудованные всем необходимым перечнем природоохранных сооружений, регламентируемым современным законодательством в области строительства, эксплуатации и рекультивации полигонов захоронения отходов. Однако не все объекты, обладающие неполным перечнем природоохранных сооружений, оказывают значительное воздействие на окружающую среду [1–10].

К одному из негативных факторов влияния полигонов ТКО на окружающую среду относят образование фильтрата и его проникновение за пределы объектов. В ходе различных окислительно-восстановительных реакций в массиве отходов образуется жидкость, которая, смешиваясь с атмосферными осадками, просачивается к основанию полигона [11, 12].

Эту высокотоксичную жидкость, которая характеризуется высокими концентрациями загрязняющих веществ, называют свалочным фильтратом. При нормальной эксплуатации объекта фильтрат должен отводиться по противофильтрационному экрану специализированной системой сбора и отвода и далее, перед сбросом в водоток, очищаться на специализированных сооружениях [7–9, 13–15].

Одним из важнейших элементов, который позволяет снизить воздействие полигона размещения отходов на окружающую среду, является противофильтрационный экран, устраиваемый в основании объекта и предотвращающий проникновение фильтрационных вод в толщу основания под объектом размещения отходов. Противофильтрационный экран представляет собой слоистую конструкцию из разных материалов, позволяющую предотвратить проникновение фильтрата за пределы массива отходов. Он выполняется из естественных (глина) и искусственных противофильтрационных материалов [10, 11]. Согласно современным нормам [11], экран должен состоять из комбинации искусственного и естественного материалов или 2 искусственных материалов разной структуры и происхождения. На старых полигонах (санкционированных свалках) экраны построены преимущественно из природных материалов (глины) с низким коэффициентом фильтрации.

Учитывая распространенность старых объектов размещения отходов с большим сроком эксплуатации, с отсутствующей системой сбора и отвода фильтрата, с экраном из природных материалов, возникает необходимость оценки воздействия полигонов ТКО на окружающую среду в части возможного распространения загрязнения, вызванного проникновением фильтрационных вод в толщу основания под объектами размещения отходов с последующей разгрузкой в поверхностные водотоки.

Для оценки влияния необходимы исследования состояния грунтовых и поверхностных вод в местах расположения объектов размещения отходов, которые и были проведены в рамках данной работы. Исследование направлено для подтверждения возможности использования фильтрационных и сорбционных характеристик дамб из естественных материалов на старых полигонах размещения твердых коммунальных отходов для предотвращения или минимизации их воздействия на окружающую среду.

Характеристики рассматриваемого полигона ТКО

Рассматриваемый объект размещения отходов эксплуатируется более 20 лет. В рамках экологического мониторинга на территории объекта постоянно проводятся исследования компонентов окружающей природной среды. Исследования проводятся по всем компонентам окружающей среды: атмосферному воздуху, почвам в границах санитарно-защитной зоны, подземным и поверхностным водам, а также уровню радиационного излучения. Полигон оборудован защитным нижним слоем (экраном), препятствующим проникновению фильтрата в подземные воды. В качестве изоляционного слоя используется природный слой суглинка и глины, распределенный по территории практическим равномерно и по толщине превышающий 1 м. Полигон оборудован дренажной системой, что позволяет фильтрату свободно стекать в пруды для временного накопления с целью дальнейшей очистки или вывоза за пределы объекта. По периметру полигон обвалован дамбой, высотой до 6 м. Рельеф площадки размещения объекта неровный с общим уклоном в северо-восточном направлении. Прилегающая территория представляет собой холмистую местность, поросшую луговой растительностью, кустарником, мелколиственными породами деревьев. Территория полигона ограничена лесопарковой зоной.

Высота отсыпанных ТКО составляет порядка 20–30 м. По составу техногенные грунты сложены коммунальными отходами и отходами производства: полиэтилен – 20–50 %, строительный мусор – 15–30 %, текстиль – 10–20 %, макулатура – 8–20 %, пластик – 9–15 %, древесина – 8–20 %, стекло – 7–15 %, металл (в виде тросов, проволоки, кусков арматуры) – 7–15 %, минеральный грунт – 10 %, строительный мусор (щебень, галька, бетон, кирпич) – 10–20 %, прочее – 6–15 %.

В гидрогеологическом отношении территория характеризуется трещинно-грунтовыми и трещинно-пластовыми водами линзовидных коллекторов. Общее движение потока подземных вод направлено на северо-восток. Скорость фильтрации потока изменяется от 0,6 до 0,92 м/сут. Гидравлический уклон варьируется от 0,07 до 0,3.

Методы исследования

На исследуемом объекте летом 2024 г. проводились полевые инженерно-геологические работы. Для исследований были выбраны участки, расположенные вблизи прудов-накопителей полигона ТКО. Отбор

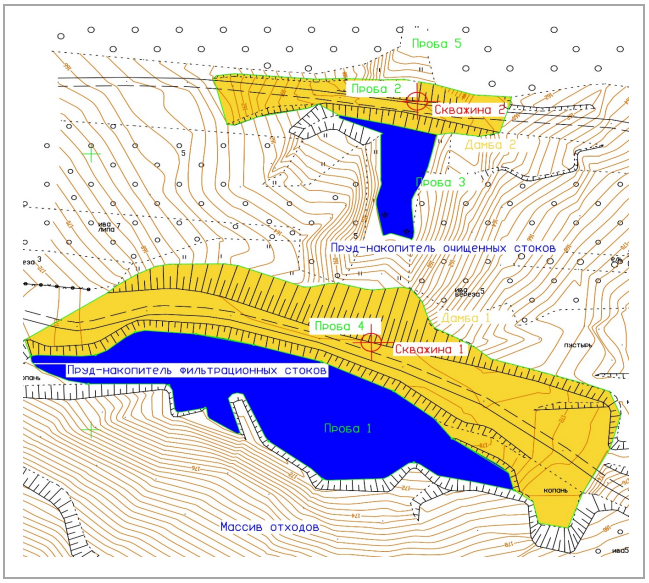
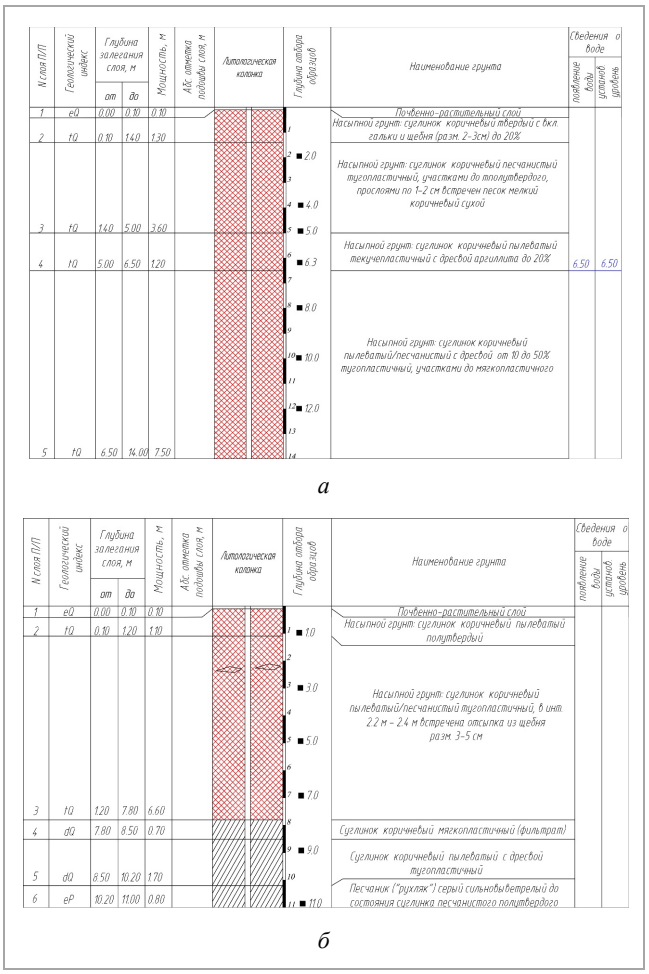


Рис. 1. Схема участка исследований



а

б

Рис. 2. Результаты определения сложения грунтового массива в основании исследуемой территории: *а* – по скважине-1; *б* – скважине-2

образцов грунтов осуществлялся по преобладающим направлениям движения грунтовых вод. Бурение скважин производилось механическим колонковым способом станком УРБ-2А диаметром 127 мм, с креплением в неустойчивых грунтах. В процессе проходки скважин велось послойное описание всех встречаемых разновидностей грунтов с описанием их структурных особенностей. Инженерно-геологическое апробирование осуществлялось в целях изучения физико-механических свойств грунтов и выявления основных закономерностей пространственной изменчивости их свойств. Одновременно определялись уровни грунтовых вод. После окончания горно-буровых работ осуществлялась обсадка скважины для дальнейшего ее использования с целью мониторинга состояния подземных вод. Скважины были закреплены обсадными трубами диаметром 0,127 м до испытуемого интервала.

Гидрогеологические исследования

Территория исследования представляет собой каскад из 2 прудов, разделенных дамбой. Первый пруд используется для накопления фильтрационных вод, второй – для накопления отфильтрованного через дамбу стока. Пруд – накопитель очищенных стоков с внешней стороны также огражден дамбой. Бурение скважин для изучения состава и миграции подземных вод осуществлялось на дамбах. Схема размещения скважин, прудов и точек отбора проб представлена на рис. 1. Перепад высот между скважиной-1 и скважиной-2 составляет порядка 15 м с уменьшением высотных отметок в северном направлении. Подземных и надземных сооружений и коммуникаций не встречено.

По результатам бурения мощность насыпных грунтов в телах дамб составила 7,8…14,8 м. В результате визуального наблюдения керна грунта при бурении скважины-1 (верхняя дамба) можно предположить, что зона фильтрации техногенных вод из пруда – накопителя фильтрационных стоков в пруд – накопитель очищенных стоков находится в интервалах глубин 6,5–7,8 м. При проходке скважины-2 (нижняя дамба) грунтовые воды не обнаружены. Данное условие требует дополнительных исследований и может быть обусловлено спецификой устройства грунтового массива дамбы.

В геологическое строение участка вовлечены техногенные, делювиальные отложения четвертичного возраста и выветрелые элювиальные отложения пермской системы.

Район работ согласно СП 131.13330.2020 относится к строительному климатическому району IB.

В гидрогеологическом отношении изучаемая территория относится к гидрогеологической области западного Урала. В период исследований (лето 2024 г.) в пределах исследуемых глубин до 14,0 м были вскрыты подземные техногенные воды. Водовмещающими грунтами являются техногенные отложения. В скважине-1 техногенные воды обнаружены на глубине 6,5 м.

Согласно районированию, на исследуемом участке нет карстующихся пород. По данным рекогносцировочного обследования поверхностных карстопроявлений и подземных форм карста на глубину 14,0 м на исследуемом участке не обнаружено.

Ниже представлены геологические колонки по результатам бурения скважин-1, 2 (рис. 2).

Анализ состава поверхностных и подземных вод

В исследованиях, посвященных химическому составу свалочного фильтрата, подчеркивается его ключевая характеристика – высокая изменчивость показателей с течением времени. Эта вариабельность в основном связана с изменениями процессов, происходящих внутри полигона, что обусловливается как его возрастом, так и временем, когда производились отборы проб фильтрата [28; 29]. В работе [29] в результате многолетнего мониторинга выявлены основные следующие вещества в фильтрате,

превышающие предельно допустимые концентрации (ПДК): хром (24), марганец (14), медь (18), свинец (6), аммоний (140), хлориды (6), нитраты (3), фосфаты (3) и сульфаты (4). В другой статье указывается, что в фильтрате концентрации тяжелых металлов не превышают значений ПДК, однако показатели pH, содержание ионов аммония, минерализация и концентрация ионов хлоридов оказались на высоком уровне [29].

В «Рекомендациях по сбору, очистке и отведению сточных вод полигонов захоронения твердых бытовых отходов» [30] представлены средние значения концентраций некоторых загрязняющих веществ в фильтрационных водах полигонов, а также диапазоны колебаний этих концентраций. Например, концентрация мышьяка может изменяться в 320 раз, общего азота – в 100 раз, кадмия – в 238 раз, свинца – в 128 раз, меди – в 350 раз, и т.д.

То есть весьма широкий диапазон значений каждого параметра фильтрата одного и того же полигона с течением времени является обычным явлением, связанным с процессами внутри полигона, с временем года, погодой и, возможно, с точками отбора фильтрата (обводная канава, накопительный водоем) и методиками анализа.

Для исследования состава фильтрационных вод в рамках настоящей работы проведен отбор проб фильтрационных и очищенных вод согласно схеме. Точки отбора проб представлены на рис. 1. Проба 1 бралась из озера фильтрата, проба 4 – из скважины при бурении, проба 3 – из пруда очищенных сточных вод, проба 5 – из болота.

Фильтрационные воды имеют сложный химический состав примесей. В табл. 1 приведены результаты количественного химического анализа сточных и очищенных сточных вод, отобранных летом 2024 г. Одним из основных факторов, влияющих на состав фильтрационных вод (в том числе при отборе в прудах-накопителях), являются климатические условия. Пробоотбор проводился в июне-июле 2024 г. Июнь 2024 г. в районе г. Перми выдался теплым и дождливым. Во второй половине месяца температура воздуха была близка к нормальным значениям, однако наблюдался значительный избыток осадков с множественными случаями сильных дождей и ливней. Июль 2024 г. в районе г. Перми по средней температуре соответствовал климатической норме. В среднем температура воздуха в Перми составила +18,6 °С (соответствует норме). Таким образом, в период отбора проб наблюдались повышенные значения атмосферных осадков.

Исследуемые фильтрационные и очищенные сточные воды характеризуются высокими показателями БПК и ХПК, взвешенных веществ. Соотношение $БПК_5$/ХПК позволяет делать выводы о направленности процессов разложения органических веществ в водной среде. В случае, когда это соотношение составляет примерно 0,38, это свидетельствует о накоплении в воде трудноразлагаемого органического вещества, что может указывать на ухудшение качества воды и потенциальные экологические проблемы.

Химический состав фильтрационных вод зависит от фазы биодеструкции ТКО. В зависимости от этапа жизни полигона выделяют следующие фазы биохимического распада ТКО: аэробную (период – несколько месяцев), анаэробную – гидролиз (1–3 года), ацетогенез (3–10 лет), активный метаногенез (10–30 лет), стабильную фазу метаногенеза и полную ассимиляцию (до 100 лет). Таким образом, этап жизненного цикла полигона и стадия биодеградации отходов могут быть определены по индикаторным показателям загрязнения фильтрационных вод: соотношению величин $БПК_5$/ХПК, содержанию ионов цинка.

Ацетогенной фазе соответствуют значения соотношения $БПК_5$/ХПК в пределах 0,8–0,6; содержания ионов ионов цинка – до 70 мг/дм^3. Для метаногенной фазы характерны значения соотношения $БПК_5$/ХПК в пределах 0,6–0,06; содержание ионов ионов цинка 0,1–3 мг/дм^3 [16]. По результатам анализа исследуемого фильтрата $БПК_5$/ХПК лежит в пределах 0,027–0,043, содержание ионов цинка 0,011–0,032. Сопоставление результатов химических анализов с индикаторными показателями загрязнения фильтрационных вод приводит к выводу, что происходящие в толще свалки процессы относятся к стабильной метаногенной фазе биодеструкции отходов. Это соответствует действительности, поскольку рассматриваемый полигон ТКО функционирует более 40 лет.

Основными мерами защиты подземных вод от фильтрата полигонов твердых коммунальных и промышленных отходов являются создание противофильтрационного экрана, установка дренажных систем в основании полигона, а также организация сбора и очистки фильтрата и отвода поверхностного стока. Устройство высокоэффективной системы сбора и отвода фильтрационных вод возможно только на современных, вновь возводимых полигонах размещения отходов. Старые полигоны (рассматриваемый в данной работе объект) преимущественно оснащались минимальными системами защиты окружающей природной среды – противофильтрационным экраном и системами сбора фильтрационных вод с помощью кольцевых каналов.

Таблица 1

Результаты количественного химического анализа проб фильтрационной воды, взятой из пруда – накопителя фильтрационных вод

Определяемый показатель	Полигон ТКО, июль 2024
Барий, мг/дм^3	2,78
Хлорид-ион, мг/дм^3	2010
Сульфат-ион, мг/дм^3	1820
Нитрат-ион, мг/дм^3	1,85
Нитрит-ион, мг/дм^3	2,71
ХПК, мгО/дм^3	2930
$БПК_5$, мг/дм^3	82
Массовая концентрация сухого остатка, мг/дм^3	8360
Цинк, мг/дм^3	0,11
Мышьяк, мг/дм^3	Менее 0,0050
Плотность, кг/м^3	1005

Фильтрат, образуясь в толще массива отходов, по экрану стекал к границам и разгружался в открытый канал. Открытые каналы транспортировали фильтрационные стоки в пруд-накопитель.

Однако даже при реализации защитных мероприятий существует риск загрязнения подземных вод фильтрационным стоком и возможная миграция фильтрата за пределы полигона ТКО. Это может произойти из-за просачивания фильтрата через защитные конструкции, вызванного взаимодействием химических соединений фильтрационных вод и почвы, дефектами в элементах противофильтрационного экрана, а также другими факторами. Таким образом, важно постоянно контролировать состояние защитных устройств и проводить мониторинг подземных вод для своевременного выявления и предотвращения загрязнения.

В рамках реализуемой природоохранной деятельности на объекте исследования ежегодно проводится мониторинг компонентов окружающей природной среды. Результаты мониторинга показывают отсутствие влияния объекта на окружающую природную среду.

Одна из задач проводимых исследований в рамках данной работы – оценка степени очистки фильтрационных вод при проходе через фильтрующую дамбу из пруда – накопителя фильтрационных вод в пруд – накопитель очищенных сточных вод, а также подтверждение отсутствия влияния потока фильтрационных вод на компоненты окружающей природной среды за пределами объекта.

Результаты измерений показателей сточных и очищенных вод, взятых в пруде – накопителе очищенных стоков (проба № 3), болота, находящегося на расстоянии около 50 м от дамбы (проба № 5), приведены в табл. 2. Полученные результаты дали возможность сделать выводы, что при фильтрации сточных вод полигона ТКО через искусственную дамбу происходит значительное снижение концентраций большинства исследуемых загрязняющих веществ фильтрационных вод. Происходит значительное изменение значений ХПК и $БПК_5$. Вода из пруда – накопителя очищенных сточных вод не соответствует по некоторым показателям ПДК, но предварительная очистка с помощью фильтрующих дамб позволяет использовать стоки в качестве технической воды при осуществлении технологических процессов при размещении отходов, а также значительно сокращает стоимость последующей очистки сточных вод и расширяет перечень методов, возможных к применению при очистке.

По результатам анализа выявлено превышение концентраций некоторых веществ в природных водах болота, образованного за противофильтрационной дамбой (проба № 5). Однако показатели пробы № 5 в целом характерны для природных вод (болота и застойные водные объекты).

Фильтрационные воды объектов размещения отходов могут оказывать значительное влияние на грунтовые воды и грунты в основании.

Защищенность подземных вод зависит от множества факторов, которые объединены в три группы: природные, техногенные и физико-химические. К техногенным факторам, влияющим на защищенность подземных вод от загрязнения фильтрационными водами, можно отнести условия захоронения отходов. Важные аспекты включают наличие противофильтрационных экранов, систем сбора и отвода фильтрационных вод в основании полигона, использование и состав изолирующих слоев, а также предварительное извлечение вторичных ресурсов и опасных компонентов из отходов. Эти меры способствуют минимизации негативного воздействия отходов на подземные воды и повышают общую эффективность их защиты.

Таблица 2

Результаты количественного химического анализа проб сточных и очищенных сточных вод

Определяемый показатель	Полигон ТКО, проба № 1	Полигон ТКО, проба № 3	Полигон ТКО, проба № 5
Барий, мг/дм^3	2,78	0,61	0,459
Хлорид-ион, мг/дм^3	2010	240	9,02
Сульфат-ион, мг/дм^3	1820	79,6	93,7
Нитрат-ион, мг/дм^3	1,85	187	1,79
Нитрит-ион, мг/дм^3	2,71	1,36	менее 0,20
ХПК, мгО/дм^3	2930	125	226
$БПК_5$, мг/дм^3	82	7,2	18,5
Массовая концентрация сухого остатка, мг/дм^3	8360	1090	850
Цинк, мг/дм^3	0,11	Менее 0,0050	0,0070
Мышьяк, мг/дм^3	Менее 0,0050	Менее 0,0050	0,0067
Плотность, кг/м^3	1005	998	998

Таблица 3

Результаты количественного химического анализа проб воды, взятой из скважин в августе 2024 г.

Определяемый показатель	Полигон ТКО, скважина-1	Полигон ТКО, скважина-2
Барий, мг/дм^3	0,405	Менее 0,1
Хлорид-ион, мг/дм^3	1402	107
Сульфат-ион, мг/дм^3	1187	38,0
Нитрат-ион, мг/дм^3	31,4	Менее 0,20
Нитрит-ион, мг/дм^3	2,37	0,56
ХПК, мгО/дм^3	851	153
$БПК_5$, мг/дм^3	81	16,6
Массовая концентрация сухого остатка, мг/дм^3	7900	1290
Цинк, мг/дм^3	0,034	0,114
Мышьяк, мг/дм^3	0,0054	0,0053
Плотность, кг/м^3	1006	997

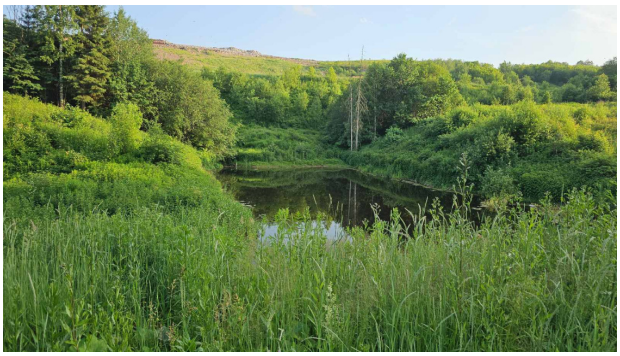


Рис. 3. Растительный покров в районе исследуемой защитной дамбы полигона ТКО

Качественная оценка защищенности грунтовых вод от загрязнения выполняется по методике, разработанной В.М. Гольдбергом, которая включает шесть категорий защищенности, определяемых по сумме баллов ε. Эти баллы зависят от глубины залегания грунтовых вод, мощности и фильтрационных свойств геологических слоев основания полигона ТКО. Эта система позволяет комплексно оценивать риски загрязнения и разрабатывать мероприятия по защите водных ресурсов.

Баллы, соответствующие градациям глубин залегания грунтовых вод, распределяются следующим образом: чем больше глубина залегания, тем лучше защищены грунтовые воды от загрязнения. Каждая последующая градация отличается от предыдущей в среднем на 10 м. Для наименьшей глубины залегания ($H < 10$ м) присваивается 1 балл, для глубины $10 < H \leq 20$ м – 2 балла, $20 < H \leq 30$ м – 3 балла, $30 < H \leq 40$ м – 4 балла, для наибольшей глубины залегания ($H > 40$ м) – 5 баллов. Такое распределение баллов позволяет учитывать глубину как важный фактор, влияющий на уровень защищенности грунтовых вод от загрязнений, и создавать более точные оценки для управления водными ресурсами.

Подземные воды на исследуемом участке залегают на глубине 7 м, что соответствует 1 баллу. В разрезе зоны аэрации имеется слой суглинков мощностью 10 м (12 баллов). Итого сумма баллов составляет 13, что соответствует средней защищенности.

Маркером распространения компонентов фильтрационных вод в том числе является химический состав грунтов, из которых состоят геологические слои вблизи полигона ТКО. По результатам мониторинга, проводимого в процессе эксплуатации объекта, превышений концентраций загрязняющих веществ не выявлено.

Для полноты понимания процессов миграции загрязняющих веществ из пробуренных скважин после установления уровня грунтовых вод произведен забор воды с последующим анализом. Результаты анализа представлены в табл. 3.

Как следует из данных табл. 3, в которой представлены показатели сточных вод из скважин-1 и -2, в процессе миграции стоков через фильтрующую дамбу происходит значительное снижение показателей. Большинство показателей близки или ниже ПДК.

Дополнительным элементом снижения воздействия объекта на окружающую среду является посадка травянистой и кустарниковой растительности.

Устойчивый растительный покров ограничивает миграцию загрязняющих веществ и защищает прилегающие территории.

Фитотехнологии – это эффективные методы и экологически безопасные решения для восстановления загрязненных почв и вод. Вблизи рассматриваемого полигона растительный покров представлен дикорастущими растениями (рис. 3).

Заключение

Проведено комплексное обследование территории в районе функционирующего полигона твердых бытовых отходов. Выполнена оценка воздействия объекта на окружающую среду в части взаимодействия фильтрационных вод с грунтовым основанием и подземными водами. Проведена оценка возможности применения фильтрационных дамб для первичной очистки фильтрационных вод объектов размещения отходов.

Результаты исследования показали, что при соответствующих технических и технологических решениях (фильтрационные дамбы, ограждающие дамбы) воздействие старых объектов размещения отходов на окружающую среду в части распространения фильтрационных вод возможно минимизировать или исключить. Одновременно на объектах возможно организовывать фильтрующие дамбы между каскадами прудов, что позволяет значительно снизить концентрации загрязняющих веществ. Снижение концентрации загрязняющих веществ позволяет расширить возможный перечень методов очистки фильтрационных вод и снизить стоимость очистки.

Библиографический список

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году: Государственный доклад. – М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023. – 686 с.
2. Singh, A. Solid waste management through the applications of mathematical models / A. Singh // Resources, Conservation and Recycling. – 2019. – Vol. 151. – 104503.
3. Batool, S.A. Municipal solid waste management in Lahore city district, Pakistan / S.A. Batool, M.N. Ch // Waste management. – 2009. – Vol. 29 (6). – P. 1971–1981.
4. Methodology to design a municipal solid waste pre-collection system. A case study / A. Gallardo, M. Carlos, M. Peris, F.J. Colomer // Waste management. – 2015. – Vol. 36. – P. 1–11.
5. Jaligot, R. Decoupling municipal solid waste generation and economic growth in the canton of Vaud, Switzerland / R. Jaligot, J. Chenal // Resources, Conservation and Recycling. – 2018. – Vol. 130. – P. 260–266.
6. Meng, X. Multi-agent based simulation for household solid waste recycling behavior / X. Meng, Z. Wen, Y. Qian // Resources, Conservation and Recycling. – 2018. – Vol. 128. – P. 535–545.
7. Seasonal variation of municipal solid waste generation and composition in four East European cities / G. Denafas, T. Ruzgas, D. Martuzevičius, S. Shmarin, M. Hoffmann, V. Mykhaylenko [et al.] // Resources, conservation and recycling. – 2014. – Vol. 89. – P. 22–30.
8. Municipal solid waste management in Indian cities–A review / M. Sharholy, K. Ahmad, G. Mahmood, R.C. Trivedi // Waste management. – 2008. – Vol. 28 (2). – P. 459–467.
9. Evalution of landfill leachate pollution and treatment / Z. Salem, K. Hamouri, R. Djemaa, K. Allia // Desalination. – 2008. – Vol. 220. – P. 108–114.
10. Temperature and gas pressure monitoring and leachate pumping tests in a newly filled MSW layer of a landfill / T. Zhang, J. Shi, X. Qian, Y. Ai // International Journal of Environmental Research. – 2019. – Vol. 13. – P. 1–19.
11. Evaluating pollution potential of leachate from landfill site, from the Pune metropolitan city and its impact on shallow basaltic aquifers / S.S. Kale, A.K. Kadam, S. Kumar, N.J. Pawar // Environmental monitoring and assessment. – 2010. – Vol. 162. – P. 327–346.
12. Leachate characteristics: Potential indicators for monitoring various phases of municipal solid waste decomposition in a bioreactor landfill / A. Mohammad, D.N. Singh, A. Podlasek, P. Osinski, E. Koda // Journal of Environmental Management. – 2022. – Vol. 309. – 114683.
13. Richards, R.G. Using microalgae for combined lipid production and heavy metal removal from leachate / R.G. Richards, B.J. Mullins // Ecological modelling. – 2013. – Vol. 249. – P. 59–67.

14. Novel and conventional technologies for landfill leachates treatment: A review / V. Torretta, N. Ferronato, I.A. Katsoyiannis, A.K. Tolkou, M. Airoldi // Sustainability. – 2016. – Vol. 9 (1). – 9.
15. Mohammed, A. Modelling heavy metals transformation in vertical flow constructed wetlands / A. Mohammed, A.O. Babatunde // Ecological Modelling. – 2017. – Vol. 354. – P. 62–71.
16. О Единых требованиях к объектам обработки, утилизации, обезвреживания, размещения твердых коммунальных отходов: Постановление Правительства РФ от 12 октября 2020 года № 1657. – М., 2020.
17. Трушин, Б.В. Принципы эффективной рекультивации полигонов ТКО / Б.В. Трушин // Твердые бытовые отходы. – 2019. – № 5. – С. 19–22.
18. Каплина, С.П. Влияние свалки ТБО г. Кимры Тверской области на поверхностные воды / С.П. Каплина, И.З. Каманина // Вестник ТвГУ. Серия: Биология и экология. – 2019. – № 3 (55). – С. 203–214.
19. Parvin, F. Impact of landfill leachate contamination on surface and groundwater of Bangladesh: a systematic review and possible public health risks assessment / F. Parvin, S.M. Tareq // Applied Water Science. – 2021. – Vol. 11 (6). – 100.
20. Shapovalov, D.A. Simulation and assessment of groundwater and surface water pollution by the filtrate of solid waste landfill / D.A. Shapovalov, R.N. Kholin, U.E. Skorobogatova // International Agricultural Journal. – 2021. – No. 2. – P. 8–19.
21. Малышева, А.В. Очистка фильтратов полигонов: мембранные технологии / А.В. Малышева // Твердые бытовые отходы. – 2011. – № 6 (60). – С. 32–33.
22. Технология очистки дренажных полигонных вод / А.А. Поворов, В.Ф. Павлова, Н.А. Шиненкова, О.Ю. Логунов // Твердые бытовые отходы. – 2009. – № 4 (34). – С. 26–27.
23. Литификация фильтрата полигонов ТКО как способ его утилизации / А.В. Язев, Н.О. Милютина, Н.А. Аверьянова, Е.С. Великосельская, Н.А. Политаева // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24, № 6. – С. 36–41.
24. Du, Y.J. Experimental study of migration of potassium ion through a two-layer soil system / Y.J. Du, S. Hayashi, S.Y. Liu // Environmental Geology. – 2005. – Vol. 48. – P. 1096–1106.
25. СП 320.1325800.2017. Свод правил. Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация / утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 17.11.2017 N 1555/пр (ред. от 16.03.2022). – М., 2022.
26. Минашкина, А.В. Разработка программы мониторинга водных объектов вблизи рекультивированного полигона ТКО в пос. им. А. Космодемьянского Калининградской области / А.В. Минашкина, С.В. Кондратенко, Е.А. Воробьева // Гидрометеорология и экология. – 2021. – № 62. – С. 96–112.
27. Ашихмина, Т.В. Системный подход к моделированию сложных процессов взаимодействия объектов размещения отходов с окружающей средой в управлении экологической безопасностью антропогенных геоэкологических систем / Т.В. Ашихмина // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2021. – Т. 7, № 2. – С. 291–306.
28. Организация мониторинга объектов размещения отходов (на примере полигона твердых бытовых отходов Московской области) / Е.Н. Ковалева, А.С. Яковлев, С.А. Яковлев, Е.А. Дувалина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 1 (9). – С. 2418–2422. DOI: 10.15862/03NZVN320.
29. Степаненко, Е.Е. Исследование химического состава фильтрационных вод полигона твердых бытовых отходов / Е.Е. Степаненко, О.А. Поспелова, Т.Г. Зеленская // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11, № 1 (3). – С. 525–527.
30. 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.
31. Vertical migration of leachate pollutants in clayey soils beneath an uncontrolled landfill at Huainan, China: A field and theoretical investigation / T.L.T. Zhan, C. Guan, H.J. Xie, Y.M. Chen // Science of the Total Environment. – 2014. – Vol. 470. – P. 290–298.
32. Гольдберг, В.М. Взаимосвязь подземных вод и природной среды / В.М. Гольдберг. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 248 с.
33. Офрихтер, В.Г. Экспериментально-теоретическое обоснование геотехнического использования хранилищ ТБО в качестве оснований: автореф. дис… д-ра техн. наук / В.Г. Офрихтер. – Волгоград, 2016. – 41 с.
34. Управление отходами. Сточные воды и биогаз полигонов захоронения твердых коммунальных отходов / Я.И. Вайсман, В.Н. Коротаев, И.С. Глушанкова [и др.]; под ред. Я.И. Вайсман. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т., 2012. – 258 с.
35. Оценка состояния полигонов захоронения ТБО по изменению органической составляющей / Ю.В. Завизион, Н.Н. Слюсарь, И.С. Глушанкова, Ю.М. Загорская, В.Н. Коротаев // Экология и промышленность России. – 2015. – № 7. – С. 26–31.
36. Physical characterization of municipal solid waste for geotechnical purposes / D. Zekkos, E. Kavazanjian, J.D. Bray, N. Matasovic, M.F. Riemer // ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – New York: ASCE, 2010. – Vol. 136, iss. 9. – P. 1231–1241.
37. In situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills / W.N. Houston, S.L. Houston, J.W. Liu, A. Elsayed, C.O. Sanders // Earthquake Design and performance of solid waste landfills. – ASCE GSP no. 54. – New York: ASCE, 1995. – P. 73–82.
38. Ritzkowski, M. Landfill aeration worldwide: Concepts, indications and findings / M. Ritzkowski, R. Stegmann // Waste Management. – 2012. – Vol. 32, iss. 7. – P. 1411–1419. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.02.020
39. Максимова, С.В. Экологические основы освоения территорий закрытых свалок и полигонов захоронения твердых бытовых отходов: дис. … д-ра техн. наук / С.В. Максимова. – Пермь, 2004. – 283 с.
40. Воронкова, Т.В. Построение материального баланса загрязняющих веществ при захоронении твердых бытовых отходов как способ управления эмиссией фильтрата и биогаза / Т.В. Воронкова, М.В. Висков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2012. – Т. 4. – С. 279–283.
41. Вайсман, Я.И. Управление отходами. Захоронение твердых бытовых отходов: учеб. пособие / Я.И. Вайсман, В.Н. Коротаев, В.Ю. Петров; Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2001. – 133 с.
42. Вайсман, Я.И. Управление отходами. Полигонные технологии захоронения твердых бытовых отходов. Рекультивация и потэксплуатационное обслуживание полигона: учеб. пособие / Я.И. Вайсман, В.Н. Коротаев, В.Ю. Петров; Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2012. – 244 с.
43. Офрихтер, В.Г. Условие текучести твердых бытовых отходов / В.Г. Офрихтер, Н.Н. Лихачева // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2012. – Вып. 29 (48). – С. 136–142.
44. Air and landfill gas movement through passive gas vents installed in closed landfills / H.J. Kim, H. Yoshida, T. Matsuto, Y. Tojo, T. Matsuo // Waste Management. – 2010. – Vol. 30, iss. 3. – P. 465–472. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.10.005
45. Cossu, R. Proposal of a methodology for assessing the final storage quality of a landfill / R. Cossu, T. Lai, E. Piovesan // Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium. – S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 2007. – P. 345–349.

References

1. O sostoianii i ob okhrane okruzhaiushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2022 godu: Gosudarstvennyi doklad [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2022: State report]. Moscow: Minprirody Rossii; Moskovskii gosudarstvennyi universitet imeni M.V. Lomonosova, 2023, 686 p.
2. Singh A. Solid waste management through the applications of mathematical models. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, vol. 151, 104503. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104503
3. Batool, S.A., Ch M.N. Municipal solid waste management in Lahore city district, Pakistan. *Waste management*, 2009, vol. 29 (6), pp. 1971-1981. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.12.016
4. Gallardo A., Carlos M., Peris M., Colomer F.J. Methodology to design a municipal solid waste pre-collection system. A case study. *Waste management*, 2015, vol. 36, pp. 1-11. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.11.008
5. Jaligot R., Chenal J. Decoupling municipal solid waste generation and economic growth in the canton of Vaud, Switzerland. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, vol. 130, pp. 260-266. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.12.014
6. Meng, X., Wen Z., Qian Y. Multi-agent based simulation for household solid waste recycling behavior. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, vol. 128, pp. 535-545. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.09.033
7. Denafas G., Ruzgas T., Martuzevičius D., Shmarin S., Hoffmann M., Mykhaylenko V. et al. Seasonal variation of municipal solid waste generation and composition in four East European cities. *Resources, conservation and recycling*, 2014, vol. 89, pp. 22-30. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.06.001
8. Sharholy M., Ahmad K., Mahmood G., Trivedi R.C. Municipal solid waste management in Indian cities-A review. *Waste management*, 2008, vol. 28 (2), pp. 459-467. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.02.008
9. Salem Z., Hamouri K., Djemaa R., Allia K. Evalution of landfill leachate pollution and treatment. *Desalination*, 2008, vol. 220, pp. 108-114. DOI: 10.1016/j.desal.2007.01.026
10. Zhang T., Shi J., Qian X., Ai Y. Temperature and gas pressure monitoring and leachate pumping tests in a newly filled MSW layer of a landfill. *International Journal of Environmental Research*, 2019, vol. 13, pp. 1-19. DOI: 10.1007/s41742-018-0157-0
11. Kale S.S., Kadam A.K., Kumar S., Pawar N.J. Evaluating pollution potential of leachate from landfill site, from the Pune metropolitan city and its impact on shallow basaltic aquifers. *Environmental monitoring and assessment*, 2010, vol. 162, pp. 327-346. DOI: 10.1007/s10661-009-0799-7
12. Mohammad A., Singh D.N., Podlasek A., Osinski P., Koda E. Leachate characteristics: Potential indicators for monitoring various phases of municipal solid waste decomposition in a bioreactor landfill. *Journal of Environmental Management*, 2022, vol. 309, 114683. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114683
13. Richards R.G., Mullins B.J. Using microalgae for combined lipid production and heavy metal removal from leachate. *Ecological modelling*, 2013, vol. 249, pp. 59-67. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2012.07.004
14. Torretta V., Ferronato N., Katsoyiannis I.A., Tolkou A.K., Airoldi M. Novel and conventional technologies for landfill leachates treatment: A review. *Sustainability*, 2016, vol. 9 (1), 9. DOI: 10.3390/su9010009
15. Mohammed A., Babatunde A.O. Modelling heavy metals transformation in vertical flow constructed wetlands. *Ecological Modelling*, 2017, vol. 354, pp. 62-71. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2017.03.012
16. O Edinykh trebovaniiakh k ob"ektam obrabotki, utilizatsii, obezvrezhivaniia, razmeshcheniia tverdykh kommunal'nykh otkhodov: Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 12 oktiabria 2020 goda № 1657 [On Uniform Requirements for Facilities for Processing, Utilization, Disposal, and Placement of Solid Municipal Waste: RF Government Resolution No. 1657 of October 12, 2020]. Moscow, 2020.

17. Trushin B.V. Printsipy effektivnoi rekul'tivatsii poligonov TKO [Principles of effective reclamation of solid municipal waste landfills]. *Tverdye bytovye otkhody*, 2019, no. 5, pp. 19-22.
18. Kaplina S.P., Kamanina I.Z. [Vliianie svalki TBO Kimry Tverskoi oblasti na poverkhnostnye vody [Influence of dump wastes on the state of surface waters in Kimry town, Tverskoy region]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiia i ekologiia*, 2019, no. 3 (55), pp. 203-214.
19. Parvin F., Tareq S.M. Impact of landfill leachate contamination on surface and groundwater of Bangladesh: a systematic review and possible public health risks assessment. *Applied Water Science*, 2021, vol. 11 (6), 100. DOI: 10.1007/s13201-021-01431-3
20. Shapovalov D.A., Kholin R.N., Skorobogatova U.E. Simulation and assessment of groundwater and surface water pollution by the filtrate of solid waste landfill. *International Agricultural Journal*, 2021, no. 2, pp. 8-19.
21. Malysheva A.V. Ochistka fil'tratov poligonov: membrannye tekhnologii [Landfill Leachate Treatment: Membrane Technologies]. *Tverdye bytovye otkhody*, 2011, no. 6 (60), pp. 32-33.
22. Povorov A.A., Pavlova V.F., Shinenkova N.A., Logunov O.Iu. Tekhnologiia ochistki drenazhnykh poligonnykh vod [Technology of purification of drainage landfill waters]. *Tverdye bytovye otkhody*, 2009, no. 4 (34), pp. 26-27.
23. Iazev A.V., Miliutina N.O., Aver'ianova N.A., E.S. Velikosel'skaia, N.A. Politaeva Litifikatsiia fil'trata poligonov TKO kak sposob ego utilizatsii [Lithification of msw landfill leachate as a way of its disposal]. *Ekologiia i promyshlennost' Rossii*, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 36-41. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-6-36-41
24. Du Y.J., Hayashi S., Liu S.Y. Experimental study of migration of potassium ion through a two-layer soil system. *Environmental Geology*, 2005, vol. 48, pp. 1096-1106. DOI: 10.1007/s00254-005-0050-y
25. SP 320.1325800.2017. Svod pravil. Poligony dlia tverdykh kommunal'nykh otkhodov. Proektirovanie, ekspluatatsiia i rekul'tivatsiia, utv. i vveden v deistvie Prikazom Minstroia Rossii ot 17.11.2017 N 1555/pr (red. ot 16.03.2022) [SP 320.1325800.2017. Code of Practice. Landfills for Municipal Solid Waste. Design, Operation, and Reclamation, approved and put into effect by Order of the Ministry of Construction of Russia dated 11/17/2017 N 1555/pr (as amended on 03/16/2022)]. Moscow, 2022.
26. Minashkina A.V., Kondratenko S.V., Vorob'eva E.A. Razrabotka programmy monitoringa vodnykh ob"ektov vblizi rekul'tivirovannogo poligona TKO v pos. im. A. Kosmodem'ianskogo Kaliningradskoi oblasti [Development of a program for monitoring water bodies near recultivated landfill in the village named after A. Kosmodemyansky in the Kaliningrad region]. *Gidrometeorologiia i ekologiia*, 2021, no. 62, pp. 96-112. DOI: 10.33933/2074-2762-2021-62-96-112
27. Ashikhmina T.V. Sistemnyi podkhod k modelirovaniiu slozhnykh protsessov vzaimodeistviia ob"ektov razmeshcheniia otkhodov s okruzhaiushchei sredoi v upravlenii ekologicheskoi bezopasnost'iu antropogennykh geoekologicheskikh sistem [A systematic approach to modeling complex processes of interaction between waste disposal facilities and the environment in the ecological safety of antropogenic geoecological systems managment]. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiia. Geologi*, 2021, vol. 7, no. 2, pp. 291-306.
28. Kovaleva E.N., Iakovlev A.S., Iakovlev S.A., Duvalina E.A. Organizatsiia monitoringa ob"ektov razmeshcheniia otkhodov (na primere poligona tverdykh bytovykh otkhodov Moskovskoi oblasti) [Organization the monitoring of wastage objects placement (on example of solid household wastage polygon in moscow oblast)]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 1 (9), pp. 2418-2422. DOI: 10.15862/03NZVN320
29. Stepanenko E.E., Pospelova O.A., Zelenskaia T.G. Issledovanie khimicheskogo sostava fil'tratsionnykh vod poligona tverdykh bytovykh otkhodov [Study of the chemical composition of filtration waters of a solid municipal waste landfill]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2009, vol. 11, no. 1 (3), pp. 525-527.
30. Rekomendatsii po sboru, ochistke i otvedeniiu stochnykh vod poligonov zakhoroneniia tverdykh bytovykh otkhodov [Recommendations for the collection, treatment and disposal of wastewater from solid municipal waste landfills]. Moscow: FGUP “Federal'nyi tsentr blagoustroistva i obrashcheniia s otkhodami”, 2003, 49 p.
31. Zhan T.L.T., Guan C., Xie H.J., Chen Y.M. Vertical migration of leachate pollutants in clayey soils beneath an uncontrolled landfill at Huainan, China: A field and theoretical investigation. *Science of the Total Environment*, 2014,v. 470, pp. 290-298. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.09.081
32. Gol'dberg V.M. Vzaimosviaz' podzemnykh vod i prirodnoi sredy [The relationship between groundwater and the natural environment]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 248 p.
33. Ofrikhter V.G. Eksperimental'no-teoreticheskoe obosnovanie geotekhnicheskogo ispol'zovaniia khranilishch TBO v kachestve osnovanii [Experimental and theoretical substantiation of geotechnical use of solid waste storage facilities as foundations]. Abstract of Doctor’s degree dissertation. Volgograd, 2016, 41 p.
34. Vaisman Ia.I., Korotaev V.N., Glushankova I.S. et al. Upravlenie otkhodami. Stochnye vody i biogaz poligonov zakhoroneniia tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Waste management. Wastewater and biogas from solid municipal waste landfills]. Ed. Ia.I. Vaisman. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2012, 258 p.
35. Zavizion Iu.V., Sliusar' N.N., Glushankova I.S., Zagorskaia Iu.M., Korotaev V.N. Otsenka sostoianiia poligonov zakhoroneniia TBO po izmeneniiu organicheskoi sostavliai Evaluation of the State of Disposal Polygons of Solid Domestic Waste by the Variation in the Organic Component]. *Ekologiia i promyshlennost' Rossii*, 2015, no. 7, pp. 26-31. DOI: 10.18412/1816-0395-2015-7-26-31
36. Zekkos D., Kavazanjian E., Bray J.D., Matasovic N., Riemer M.F. Physical characterization of municipal solid waste for geotechnical purposes. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. New York: ASCE, 2010, vol. 136, iss. 9, pp. 1231-1241. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000326
37. Houston W.N., Houston S.L., Liu J.W., Elsayed A., Sanders C.O. In situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills. *Earthquake Design and performance of solid waste landfills*. ASCE GSP no. 54. New York: ASCE, 1995, pp. 73-82.
38. Ritzkowski M., Stegmann R. Landfill aeration worldwide: Concepts, indications and findings. *Waste Management*, 2012, vol. 32, iss. 7, pp. 1411-1419. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.02.020
39. Maksimova S.V. Ekologicheskie osnovy osvoeniia territorii zakrytykh svalok i poligonov zakhoroneniia tverdykh bytovykh otkhodov [Ecological bases for development of territories of closed landfills and solid municipal waste disposal sites]. Doctor’s degree dissertation. Perm', 2004, 283 p.
40. Voronkova T.V., Viskov M.V. Postroenie material'nogo balansa zagriazniaiushchikh veshchestv pri zakhoronenii tverdykh bytovykh otkhodov kak sposob upravleniia emissiei fil'trata i biogaza [Construction of a material balance of pollutants in the disposal of solid municipal waste as a method for managing the emission of leachate and biogas]. *Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse*, 2012, vol. 4, pp. 279-283.
41. Vaisman Ia.I., Korotaev V.N., Petrov V.Iu. Upravlenie otkhodami. Zakhoronenie tverdykh bytovykh otkhodov [Waste management. Solid waste disposal]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2001, 133 p.
42. Vaisman Ia.I., Korotaev V.N., Petrov V.Iu. Upravlenie otkhodami. Poligonnye tekhnologii zakhoroneniia tverdykh bytovykh otkhodov. Rekul'tivatsiia i poteksploatatsionnoe obsluzhivanie poligona [Waste management. Landfill technologies for solid municipal waste disposal. Landfill reclamation and maintenance]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2012, 244 p.
43. Ofrikhter V.G., Likhacheva N.N. Uslovie tekuchesti tverdykh bytovykh otkhodov [Flowability condition of solid municipal waste]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2012, iss. 29 (48), pp. 136-142.
44. Kim H.J., Yoshida H., Matsuto T., Tojo Y., Matsuo T. Air and landfill gas movement through passive gas vents installed in closed landfills. *Waste Management*, 2010, vol. 30, iss. 3, pp. 465-472. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.10.005
45. Cossu R., Lai T., Piovesan E. Proposal of a methodology for assessing the final storage quality of a landfill. *Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium*. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 2007, P. 345-349.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-11-00214, https://rscf.ru/project/23-11-00214/.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.