

Распространение свалочного фильтрата в грунтовые воды

© 2020. А. Лонгобарди¹, профессор,
 А. Н. Елизарьев^{2,3}, к. г. н., декан, доцент,
 Э. С. Насырова², к. т. н., старший преподаватель,
 Е. Н. Елизарьева^{2,4}, к. т. н., доцент, Л. Ю. Кияшко⁵, специалист
 по интегрированной системе управления, К. Ю. Кабанов², студент,

¹Университет Салерно,
 84084, Италия, г. Салерно, ул. Джовани Паоло, д. 132,

²Уфимский государственный авиационный технический университет,
 450008, Россия, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12,

³Институт водных проблем РАН,
 119333, Россия, г. Москва, ул. Губкина, д. 3,

⁴Башкирский государственный университет,
 450076, Россия, г. Уфа, ул. З. Валиди, д. 32,

⁵ООО «Башнефть-Сервис»,
 450018, Россия, г. Уфа, ул. Элеваторная, д. 17,
 e-mail: ElinaSagitovna@yandex.ru

Для моделирования инфильтрации образующегося свалочного фильтрата через существующие слои с учётом природно-климатических условий на полигоне «Новые Черкассы» (г. Уфа, Россия) использована программа HELP. Движение токсичной жидкости, просачивающейся через слой отходов полигона в профиль грунта, смоделировано в программе HYDRUS. Полученные результаты моделирования данных за 10 лет в программе HELP показали, что в среднем ежедневно на полигоне «Новые Черкассы» образуется 341 м³ фильтрата. Повышенное количество фильтрата обусловлено возрастом полигона и отсутствием защитных мер по предотвращению инфильтрации фильтрата в почву. Выявлена сезонность в образовании фильтрата на полигоне. Отмечено отсутствие фильтрата зимой и залповый выброс весной, обусловленный интенсивным снеготаянием. Расчёты показали, что за период эксплуатации полигона «Новые Черкассы» токсичные массы распространились более чем на 7 км.

Ключевые слова: полигон, твёрдые коммунальные отходы, фильтрат, загрязнение, грунтовые воды, программы HELP и HYDRUS.

Spread of landfill leachate into groundwater

© 2020. A. Longobardi¹ ORCID: 0000-0002-1575-0782, A. N. Elizaryev^{2,3} ORCID: 0000-0002-5612-8121,
 E. S. Nasyrova² ORCID: 0000-0002-7642-4286, E. N. Elizaryeva^{2,4} ORCID: 0000-0001-5297-5561,
 L. U. Kiyashko⁵ ORCID: 0000-0003-2215-445X, K. U. Kabanov² ORCID: 0000-0001-9472-1164,

¹University of Salerno,
 132, Via Giovanni Paolo II, Salerno, Italy, 84084,

²Ufa State Aviation Technical University,
 12, K. Marksa St., Ufa, Russia, 450018,

³Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences,
 3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333,

⁴Bashkir State University,
 32, Z. Validi St., Ufa, Russia, 450076,

⁵Bashneft-Service company,
 17, Elevatoray St., Ufa, Russia, 450018,
 e-mail: ElinaSagitovna@yandex.ru

“Novyye Cherkassy” (Ufa, Russia). The HELP program is used to simulate the leachate infiltration through existing landfill layers. To simulate the movement of a toxic liquid seeping through the waste layer into the soil profile, the HYDRUS program is used. Results of 10 years hydrologic evaluation by HELP program showed that the volume of filtrate formed is 344 m³/day. Comparison of the result obtained with the works of other authors showed that the increased filtrate value is due to the landfill age (the landfill is as old as 56 years) and the lack of protective measures for prevention infiltration into the soil. The seasonality in the leachate formation at the landfill is revealed. There is no leachate in the winter (negative temperature) but in the spring volley receipt caused by snowmelt (positive temperature) occurs. In the summer months, evapotranspiration was about 77% of the total precipitation, while infiltration did not exceed 7%. In the autumn month’s evapotranspiration was only 30–40%, while infiltration increased up to 16%. The calculations showed that during landfill operation toxic mass has spread over 7 km. To prevent further environmental impact, it is necessary to close the landfill or remediate it.

Keywords: landfill, solid municipal waste, leachate, pollution, groundwater, HELP and HYDRUS programs.

В современном мире часть твёрдых коммунальных отходов (ТКО) подвергается переработке или компостированию, некоторая сжигается, но большая часть размещается на полигонах. Например, Китай производит самое большое количество ТКО в мире, поэтому вопрос утилизации отходов для них является приоритетным [1]. В Индии распространённой проблемой являются неконтролируемые свалки [2] также, как и в других странах.

Многие свалки построены несколько десятилетий назад и не соответствуют современным требованиям. Они спроектированы без мембран или систем сбора фильтрата [3–5]. В связи с этим неизбежно возникают утечки на полигонах, оказывающие негативное воздействие на окружающую среду [6].

Конечным приёмником большинства видов загрязнителей является гидросфера, поэтому рост объектов складирования отходов на водосборной площади оказывает на неё наибольшее воздействие [7–9]. Например, авторы работы [2] проанализировали 60 проб подземных вод по 22 физико-химическим показателям в разные сезоны года и большинство проб не соответствовали нормативам, предъявляемым к питьевой воде. Проведённый анализ в работе [5] показал высокие значения Си и Рв в подземных водах. Также в работе [10] указано на «очень плохое» качество подземных вод в окрестностях полигонов в Китае.

Основными проблемами при управлении отходами являются:

- Существенные территориальные различия в объёме образования ТКО [10, 11]. Например, объём ТКО в Индии от 0,3 до 1,5 кг в сутки на человека, и это значение увеличивается со скоростью 1,0–1,3% ежегодно [12]. Нигерия ежедневно производит 0,58 кг твёрдых отходов на человека [13].

- Морфологический состав ТКО [9, 12, 14].

Загрязняющие вещества (ЗВ) в составе отходов при захоронении перемешиваются с выпадающими осадками. Это приводит

к извлечению водорастворимых соединений и твёрдых частиц из отходов, с последующим образованием фильтрата. Результаты анализа фильтрата в работе [15] показали, что высокий уровень углерода (10,0–12,0 мг/л) и азота (2000–3000 мг/л) характерен для фильтратов с полигонов возрастом 5–10 лет.

Авторы в своих работах предлагают различные подходы для оценки инфильтрации через существующие слои на полигоне:

- авторами [16] предложена методика оценки массы вытекающих ЗВ и интенсивности поступления ЗВ в насыщающий слой, однако этот метод не применим для пористой среды;

- в работе [13] степень инфильтрации фильтрата на полигоне оценивали методами электрического сопротивления;

- авторами [17] разработана простая модель водного баланса полигона, связывающая осадки, эвапотранспирацию, инфильтрацию и дренаж фильтрата. Однако теоретические результаты значительно отличаются от экспериментальных;

- в работе [18] предложен алгоритм анализа фильтрата в контексте изменения геологического строения, гидрогеологических и гидрологических условий вблизи полигона, но авторами рассматривается только период без осадков.

Для моделирования антропогенного воздействия на окружающую среду разработаны различные программные продукты. Среди имитационных программ для оценки образования фильтрата рассмотрены две: HELP и HYDRUS. «Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP)» разработана Агентством по защите окружающей среды США. Модель, используемая в программе HELP, учитывает такие важные параметры, как структура почвы и объём растительности на территории складирования. Она является наиболее обоснованной для оперативной оценки и позволяет оценить как среднемесячные, так и

среднегодовые значения объёма образования фильтрата.

Программа HYDRUS (авторы J. Simunek, M.Th. Van-Genuchten, M. Seina – www.hydrus2d.com) моделирует движение воды, тепла и растворённого вещества в одномерных переменном насыщенном средах. Она также может использоваться для анализа движения воды и растворённого вещества в ненасыщенных, частично насыщенных или полностью насыщенных пористых средах. Область течения может состоять из нескольких типов почв. В программе учитываются поток и транспортировка в вертикальном, горизонтальном или в целом наклонном направлении.

В работе [19] автор указывает на то, что многофакторная зависимость объёма образования утечек от структурных и эксплуатационных особенностей полигона, от природных и климатических условий территории, является основной причиной отсутствия единого методологического подхода для оценки объёма фильтрата.

Цель работы – определение скорости инфильтрации образующегося свалочного фильтрата с учётом природно-климатических условий на примере полигона «Новые Черкассы» (г. Уфа, Россия).

Объект исследования

Полигон «Новые Черкассы» образован в 1962 г. на месте битумных ям и эксплуатируется в настоящее время. На полигоне не предусмотрено никаких защитных мер по предотвращению инфильтрации фильтрата в почву (геомембраны, дренаж или специальные укрытия отходов от попадания осадков).

Характеристики полигона:

- площадь территории складирования – 102 га;
- средняя высота складированного массива ТКО – 10 м;
- масса складированного массива ТКО – 3,5 млн т;
- среднемесячное поступление ТКО в течение года – 1300 тыс. м³;
- плотность складированных ТКО – 0,5 т/м³;
- влажность ТКО, поступающих на складирование – 80%.

Полигон «Новые Черкассы» расположен в северной части г. Уфы в пределах так называемого «Уфимского полуострова» (Бельско-Уфимская водораздельная равнина) (рис. 1) [19].

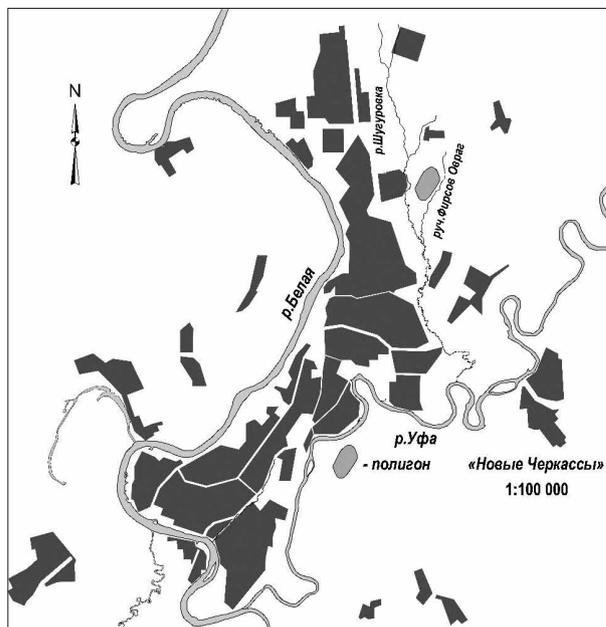


Рис. 1. Карта расположения полигона ТКО «Новые Черкассы» (г. Уфа)
Fig. 1. Map of the landfill “Novye Cherkassy” (Ufa)

С западной и северо-западной стороны территория полигона ограничена р. Шугуровка и её левым притоком – ручей Стеклянка, с восточной и юго-восточной границы полигона протекает ручей Фирсов овраг (левый приток р. Шугуровка). Сток атмосферных осадков с участка полигона осуществляется в р. Шугуровка и ручей Фирсов овраг. Склоны водотоков крутые, слабо задернованные. В ручей Фирсов овраг поступает основная часть загрязнённых поверхностных вод.

Климат района (по данным метеостанции «Уфа-Дема») континентальный, амплитуды колебаний температуры воздуха по многолетним данным достигают 88 °С (от -49 °С до +39 °С). Среднемесячная температура января составляет -14,9 °С, а июля – +18,9 °С; средне-многолетняя годовая температура +2,8 °С. Средняя продолжительность безморозного периода равняется 128 дням (варьируется в диапазоне 76–176 дней/год) [20].

Температурный режим почвы в целом повторяет годовой ход температуры воздуха. Среднегодовая температура почвы +4 °С; колеблется от -16 °С в январе до +24 °С в июле. Средняя глубина промерзания почвы составляет 94 см (варьируется в диапазоне 63–130 см).

Территория полигона относится к зоне достаточного увлажнения (гидротермический коэффициент около 1,1, относительная влажность воздуха 75%). В среднем годовая сумма осадков составляет 566 мм, отмечает-

ся до 0,5 дней с осадками 30,0 мм, до 3 дней с осадками более 20 мм, до 34 дней с осадками более 5,0 мм. Основание полигона слагают породы четвертичного, неогенового и пермского возраста.

Методы исследования

Для моделирования инфильтрации загрязнённой воды через существующие слои на полигоне использована программа HELP. Оценка объёма образования фильтрата, а также глубина инфильтрации проводилась в дождливый и зимний периоды. Для исследования выбран промежуток в 10 лет (с января 2007 г. по декабрь 2016 г.). В качестве вертикального инфильтрационного слоя выбран слой ТК0 высотой в 10 м. Профиль почвы состоит из суглинков, песчаников, глины и супесей. Индекс растительности выбран для характеристики фитоценоза. Данные о выпадении атмосферных осадков по станции «Уфа-Дема» с 2007 по 2016 гг. введены в программу вручную.

Для моделирования движения токсичной жидкости, просачивающейся через слой отходов в профиль грунта использована программа HYDRUS. Для имитации движения токсичной жидкости в профиле почвы взяты суточные

выходные данные из программы HELP и смоделированы слои профиля грунта.

Результаты и обсуждение

Среднегодовые значения показателей за 2007–2016 гг., полученные в программе HELP приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, почти 20% стока направляется в окружающие водные объекты, а образующиеся 21% фильтрата просачиваются в почву. В среднем на полигоне за сутки образуется 341 м³ фильтрата.

Например, в работе [21] авторы утверждают, что среднесуточное количество фильтрата составляет около 38 м³ для полигона возрастом 25 лет.

Как видно из таблицы 2, наблюдается симбатное изменение количества выпавших осадков и количества образовавшегося фильтрата, частично антисимбатное изменение поверхностного стока и количества образовавшегося фильтрата.

На большей части площади распространения горизонта грунтовых вод коэффициент фильтрации равен 0,1–0,5 м/сут. Движение потока грунтовых вод происходит с северо-востока на юг и на запад.

Таблица 1 / Table 1

Среднегодовые значения показателей (2007–2016 гг.)
Average annual totals (2007–2016 years)

Показатель / Parameter	мм / mm	м ³ / m ³	%
Осадки / Precipitation	566,2	5777534,4	100
Поверхностный сток / Runoff	109,0	111188,2	19,3
Эвапотранспирация / Evapotranspiration	337,7	344476,2	59,6
Образование фильтрата / Filtrate	122,1	124527,4	21,5

Таблица 2 / Table 2

Ежегодные значения по основным признакам на территории полигона (мм)
Annual values of the main hydrological parameters on the landfill territory (mm)

Год / Year	Осадки / Precipitation	Поверхностный сток / Runoff	Эвапотранспирация / Evapotranspiration	Образование фильтрата / Filtrate	Водный баланс / Water balance
2016	504,9	124,4	304,2	76,25	0,0001
2015	614,5	102,5	374,0	136,54	-0,0151
2014	540,5	125,4	283,3	133,64	0,0057
2013	645,6	143,8	369,0	126,03	-0,0046
2012	649,9	116,9	385,1	182,35	0,0033
2011	638,2	84,7	373,6	127,13	0,0160
2010	414,1	114,5	242,4	71,78	-0,0093
2009	507,0	23,8	359,4	165,85	-0,0045
2008	539,7	123,9	342,9	107,83	-0,0036
2007	607,7	130,2	343,3	93,47	-0,0075

Вертикальный перетёк загрязнённых грунтовых вод в уфимский водоносный комплекс колеблется от 0,1 до 3,0 м³/сут. Он, в первую очередь, определяется высоким градиентом фильтрации (до 2,0 ед.) и позволяет проникать супертоксикантам на глубину до 100 м, вплоть до регионального водоупора. В подобной ситуации не исключаются дальние переносы ЗВ в трещиноватых и закарстованных уфимских и кунгурских отложениях до р. Шугуровка и даже до р. Уфа.

Как показал анализ карты-схемы гидроизогипса и распространения грунтовых вод в междуречье р. Шугуровка – руч. Фирсов овраг, движение потока грунтовых вод в районе расположения полигона «Новые Черкаassy» в основном происходит в сторону р. Шугуровка и руч. Фирсов овраг, причём градиент напора загрязнённых грунтовых вод в сторону руч. Фирсов овраг выше (0,07), чем в сторону руч. Стеглянка (0,05) и р. Шугуровка (0,04). В качестве примера в таблице 3 приведены месячные значения для 2016 г.

Данные из таблицы 3 показывают, что фильтрат не образуется в период сильных заморозков (январь, февраль). А после схода снега образуется залповое поступление (апрель) свалочного фильтрата. Подобные результаты получены в работе [14], где авторами выделены значительные сезонные различия в физико-химическом составе фильтрата.

В соответствии с полученными значениями расчёта в программе HELP, установлено, что основная масса влаги собирается в весен-

ний и осенний периоды. При этом, максимальное значение зафиксировано после схода снега: объём образовавшегося свалочного фильтрата 0,060 м/день.

Принимая во внимание тот факт, что грунтовые воды залегают в основном на глубине 2,0–4,0 м, моделирование, выполненное программой, показало, что время достижения ЗВ до уровня грунтовых вод не превышает 100 дней, при учёте того, что на территории полигона преобладают суглинки.

Перенос загрязнений подводными течениями за 10 лет достигает 1,3 км. За 56 лет эксплуатации полигона токсичные массы распространились более чем на 7 км и повлекли за собой высокий уровень загрязнения окружающей среды и всех прилегающих водных объектов. Учитывая, что расстояние от зоны складирования до ручья Фирсов овраг составляет менее 0,5 км, можно предположить, что загрязнение уже накопилось в донных отложениях. Например, в работе [9] по результатам 10-летних гидрологических данных с использованием программы HELP средняя скорость просачивания фильтрата составила 1,095 м в год.

Для предотвращения дальнейшего воздействия на окружающую среду единственным способом является окончательное закрытие свалки или рекультивация. Также в работе [22] авторы указывают на то, что на старых полигонах (более 25 лет) наблюдались высокие значения электропроводности, содержание хлоридов, аммония, бора и железа в фильтрате и этот полигон близок к закрытию.

Таблица 3 / Table 3

Месячные показатели вычислений (мм) для 2016 г.
Monthly totals (mm) for 2016 year

Месяц Month	Осадки Precipitation	Поверхностный сток Runoff	Испарение Actual evapo- transpiration	Инфильтрация Infiltration
Январь / January	42,5	0,00	5,22	0,000
Февраль / February	11,7	0,00	3,60	0,000
Март / March	19,7	4,33	16,79	0,000
Апрель / April	49,2	78,33	41,16	43,641
Май / May	36,8	0,15	29,40	14,106
Июнь / June	92,1	0,27	72,34	0,000
Июль / July	81,2	22,73	63,22	5,815
Август / August	21,1	0,31	20,89	0,066
Сентябрь / September	89,8	7,52	37,55	15,182
Октябрь / October	122,3	3,19	42,99	25,727
Ноябрь / November	44,2	0,05	22,08	54,017
Декабрь / December	39,3	0,00	9,84	23,799

Заключение

Полученные результаты за 10 лет в программе HELP показали, что в среднем ежедневно на полигоне образуется 341 м³ фильтрата. Сравнение полученных результатов с работами других авторов показало, что повышенное значение фильтрата обусловлено возрастом полигона (время действия полигона – 56 лет) и отсутствием защитных мер по предотвращению инфильтрации фильтрата в почву. При этом 21% фильтрата просачивается в почву. В расчёте учитывались природно-климатические особенности территории.

Выявлена сезонность в образовании фильтрата на полигоне, связанная с климатическими особенностями рассматриваемого региона. Отмечено отсутствие фильтрата зимой (отрицательная температура воздуха) и залповый выброс весной, вызванной снеготаянием (положительная температура воздуха). В летние месяцы эвапотранспирация составила около 77% от общего количества выпавших осадков, при этом инфильтрация не превысила 7%. В осенние месяцы эвапотранспирация составила только 30–40%, в то время как инфильтрация увеличилась до 16%.

Перенос загрязнённых потоков начинается с того момента, когда фильтрат достигает уровня грунтовых вод и составляет в нашем экспериментальном поле около 60–70 дней, в зависимости от глубины залегания подземных вод. Расчёты показали, что за период эксплуатации полигона ТКО токсичные массы распространились более чем на 7 км. Для предотвращения дальнейшего воздействия на окружающую среду единственным способом является окончательное закрытие полигона или его рекультивация.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 17-77-30006).

Литература

1. Havukainen J., Zhan M., Dong J., Liikanen M., Deviatkin I., Li X., Horttanainen M. Environmental impact assessment of municipal solid waste management incorporating mechanical treatment of waste and incineration in Hangzhou, China // *Journal of Cleaner Production*. 2017. No. 141. P. 453–461.
2. De S., Maiti S., Hazra T., Dutta A. Evaluation of the impact of landfill leachate on groundwater quality in Kolkata, India // *Pollution*. 2017. No. 3 (3). P. 443–452.

3. Shevchenko A., Konon N., Tskhovrebov E., Velichko E. Innovative technologies of liquid media treatment in the system of ecological and sanitary-hygienic control of waste landfills // *MATEC Web of Conferences*. 2017. No. 106. P. 1–7.

4. Каган П.Б., Хоркина Ж.А., Зуева А.В. Мониторинг градостроительного развития городских территорий, в том числе с использованием информационных технологий // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 9 (35). С. 3–8.

5. Krčmar D., Tenodi S., Grba N., Kerkez D., Watson M., Rončević S., Dalmacija B. Preremedial assessment of the municipal landfill pollution impact on soil and shallow groundwater in Subotica, Serbia // *Science of the total environment*. 2018. No. 615. P. 1341–1354.

6. Ахтямов П.Г., Титова Т.С. Геоэкологические проблемы обеспечения безопасности при обращении с отходами. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2016. 109 с.

7. Чечевичкин В.Н., Ватин Н.И. Особенности состава и очистки поверхностного стока крупных городов // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 6 (50). С. 67–74.

8. Boateng T.K., Samuel F.O., Acquah O., Akoto O. Groundwater quality assessment using statistical approach and water quality index in Ejisu-Juaben Municipality, Ghana // *Environmental Earth Science*. 2016. No. 75. P. 489–503.

9. Nakhaei M., Amiri V., Rezaei K., Moosaei F. An investigation of the potential environmental contamination from the leachate of the Rasht waste disposal site in Iran // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2015. No. 74. P. 233–246.

10. Han Z., Ma H., Shi G., Li He, Wei L., Shi Q. A review of groundwater contamination near municipal solid waste landfill sites in China // *Science of the Total Environment*. 2016. No. 569–570. P. 1255–1264.

11. Aslani H., Taghipour H. Seasonal characterization and quantification of municipal solid waste: energy content and statistical analysis // *Journal of Advances in Environmental Health Research*. 2018. No. 6. P. 34–43.

12. Pandey B.K., Vyas S., Pandey M., Gaur A. Characterisation of municipal solid waste generated from Bhopal, India // *Current Science Perspectives*. 2016. No. 2 (3). P. 52–56.

13. Mosuro G.O., Omosanya K.O., Bayewu O.O., Oloruntola M.O., Laniyan T.A., Atobi O., Okubena M., Popoola E., Adekoya F. Assessment of groundwater vulnerability to leachate infiltration using electrical resistivity method // *Applied Water Science*. 2017. No. 7. P. 2195–2207.

14. Mavakala B.K., Faucheur S., Mulaji C.K., Laffite A., Devarajan N., Biey E.M., Giuliani G., Otamonga J., Kabatusuila P., Mpiana P.T., Poté J. Leachates draining from controlled municipal solid waste landfill: Detailed geochemical characterization and toxicity tests // *Waste management*. 2016. No. 55. P. 238–248.

15. Naveen B.P., Mahapatra D.M., Sitharam T.G., Sivapullaiah P.V., Ramachandra T.V. Physico-chemical

and biological characterization of urban municipal landfill leachate // *Environmental Pollution*. 2017. No. 220 (A). P. 1–12.

16. Szymański K., Janowska B., Iżewska A., Sidelko R., Siebińska I. Method of evaluating the impact of landfill leachate on groundwater quality // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2018. No. 190. P. 415–423.

17. Heimovaara T.J., Bun A., Van Turnhout A.G. Water balance modeling for estimation of residence time of water in a full-scale landfill using a data-assimilation approach // *InHPM6: The 6th International Workshop Hydro-Physico-Mechanics of Landfills*, Delft, The Netherlands, 14–17 April 2015.

18. Giang N.V., Kochanek K., Vu N.T., Duan N.B. Landfill leachate assessment by hydrological and geophysical data: case study NamSon, Hanoi, Vietnam // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2018. No. 20. P. 1648–1662.

19. Кияшко И.Ю. Геоэкологическая оценка влияния складирования отходов на водные объекты (на примере Республики Башкортостан): дис. ... канд. геогр. наук. Казань, 2011. 232 с.

20. Afanasev I., Volkova T., Elizaryev A., Longobardi A. Analysis of interpolation methods to map the long-term annual precipitation spatial variability for the Republic of Bashkortostan, Russian Federation // *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2014. No. 1 (10). P. 405–416.

21. Nebojša K., Siniš C., Dunović S. Determining leachate quantity at Brijesnica regional sanitary landfill in Bijeljina // *Archives for Technical Sciences*. 2015. No. 13 (1). P. 67–72.

22. Talalaj I.A. Mineral and organic compounds in leachate from landfill with concentrate recirculation // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. No. 4 (22). P. 2622–2633.

References

1. Havukainen J., Zhan M., Dong J., Liikanen M., Deviatkin I., Li X., Horttanainen M. Environmental impact assessment of municipal solid waste management incorporating mechanical treatment of waste and incineration in Hangzhou, China // *Journal of Cleaner Production*. 2017. No. 141. P. 453–461. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.146

2. De S., Maiti S., Hazra T., Dutta A. Evaluation of the impact of landfill leachate on groundwater quality in Kolkata, India // *Pollution*. 2017. No. 3 (3). P. 443–452. doi: 10.7508/PJ.2017.03.009

3. Shevchenko A., Konon N., Tskhovrebov E., Veličko E. Innovative technologies of liquid media treatment in the system of ecological and sanitary-hygienic control of waste landfills // *MATEC Web of Conferences*. 2017. No. 106. P. 1–7. doi: 10.1051/mateconf/201710607005

4. Kagan P.B., Khorikina Zh.A., Zueva A.V. Monitoring of urban development of urban areas, including the

use of information technology // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2012. No. 9 (35). P. 3–8 (in Russian).

5. Krčmar D., Tenodi S., Grba N., Kerkez D., Watson M., Rončević S., Dalmacija B. Preremedial assessment of the municipal landfill pollution impact on soil and shallow groundwater in Subotica, Serbia // *Science of the total environment*. 2018. No. 615. P. 1341–1354. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.283

6. Akhtyamov R.G., Titova T.S. Geoecological problems of safety in waste management. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2016. 109 p. (in Russian).

7. Chechevichkin V.N., Vatin N.I. Features of the composition and treatment of large cities surface runoff // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2014. No. 6 (50). P. 67–74 (in Russian). doi: 10.5862/MCE.50.7

8. Boateng T.K., Samuel F.O., Acquah O., Akoto O. Groundwater quality assessment using statistical approach and water quality index in Ejisu-Juaben Municipality, Ghana // *Environmental Earth Science*. 2016. No. 75. P. 489–503. doi: 10.1007/s12665-015-5105-0

9. Nakhaei M., Amiri V., Rezaei K., Moosaei F. An investigation of the potential environmental contamination from the leachate of the Rasht waste disposal site in Iran // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2015. No. 74. P. 233–246. doi: 10.1007/s10064-014-0577-9

10. Han Z., Ma H., Shi G., Li He, Wei L., Shi Q. A review of groundwater contamination near municipal solid waste landfill sites in China // *Science of the Total Environment*. 2016. No. 569–570. P. 1255–1264. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.201

11. Aslani H., Taghipour H. Seasonal characterization and quantification of municipal solid waste: energy content and statistical analysis // *Journal of Advances in Environmental Health Research*. 2018. No. 6. P. 34–43. doi: 10.22102/jaehr.2018.105728.1053

12. Pandey B.K., Vyas S., Pandey M., Gaur A. Characterisation of municipal solid waste generated from Bhopal, India // *Current Science Perspectives*. 2016. No. 2 (3). P. 52–56.

13. Mosuro G.O., Omosanya K.O., Bayewu O.O., Olorunto M.O., Laniyan T.A., Atobi O., Okubena M., Popoola E., Adekoya F. Assessment of groundwater vulnerability to leachate infiltration using electrical resistivity method // *Applied Water Science*. 2017. No. 7. P. 2195–2207. doi: 10.1007/s13201-016-0393-4

14. Mavakala B.K., Faucheur S., Mulaji C.K., Laffite A., Devarajan N., Biey E.M., Giuliani G., Otamonga J., Kabatusuila P., Mpiana P.T., Poté J. Leachates draining from controlled municipal solid waste landfill: Detailed geochemical characterization and toxicity tests // *Waste management*. 2016. No. 55. P. 238–248. doi: 10.1016/j.wasman.2016.04.028

15. Naveen B.P., Mahapatra D.M., Sitharam T.G., Sivapullaiah P.V., Ramachandra T.V. Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill

leachate // *Environmental Pollution*. 2017. No. 220 (A). P. 1–12. doi: 10.1016/j.envpol.2016.09.002

16. Szymański K., Janowska B., Izewska A., Siedłko R., Siebielska I. Method of evaluating the impact of landfill leachate on groundwater quality // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2018. No. 190. P. 415–423. doi: 10.1007/s10664-018-6776-2

17. Heimovaara T.J., Bun A., Van Turnhout A.G. Water balance modeling for estimation of residence time of water in a full-scale landfill using a data-assimilation approach // *InHPM6: The 6th International Workshop Hydro-Physico-Mechanics of Landfills*, Delft, The Netherlands, 14–17 April 2015.

18. Giang N.V., Kochanek K., Vu N.T., Duan N.B. Landfill leachate assessment by hydrological and geophysical data: case study NamSon, Hanoi, Vietnam // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2018. No. 20. P. 1648–1662. doi: 10.1007/s10163-018-0732-7

19. Kiyashko I.Yu. Geoecological assessment of waste storage impact on water bodies (on the example Republic of Bashkortostan): Diss. ... kand. geograph. nauk. Kazan, 2011. 232 p. (in Russian).

20. Afanasev I., Volkova T., Elizaryev A., Longobardi A. Analysis of interpolation methods to map the long-term annual precipitation spatial variability for the Republic of Bashkortostan, Russian Federation // *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2014. No. 1 (10). P. 405–416.

21. Nebojša K., Siniš C., Dunović S. Determining leachate quantity at Brijesnica regional sanitary landfill in Bijeljina // *Archives for Technical Sciences*. 2015. No. 13 (1). P. 67–72.

22. Talalaj I.A. Mineral and organic compounds in leachate from landfill with concentrate recirculation // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. No. 4 (22). P. 2622–2633. doi: 10.1007/s11356-014-3533-0