
УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 556.314

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ, ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛИГОНА ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ ПАО “НИЖНЕКАМСКНЕФТЕХИМ”

© 2023 г. Р. Х. Мусин^{1,*}, А. Р. Галиева^{1,**}, Н. А. Курлянов^{2,***}

¹Казанский федеральный университет (КФУ),
ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008 Россия

²ООО “Экостандарт “Технические решения”,
Переведеновский пер., 13, Москва, 105082 Россия

*E-mail: Rustam.Musin@kpfu.ru

**E-mail: abdullina_albina94@mail.ru

***E-mail: nikitakurlyanov@gmail.com

Поступила в редакцию 10.01.2023 г.

После доработки 10.01.2023 г.

Принята к публикации 07.04.2023 г.

Одним из крупнейших нефтехимических предприятий Европы является ПАО “Нижнекамскнефтехим”. Первая промышленная продукция здесь была получена в 1967 г. Отходы производства размещаются в шламонакопителе и на полигоне отходов. Полигон функционирует с 1982 г., оборудован системами поверхностного и подземного дренажа, противодиффузионными завесами, двумя поясами наблюдательных скважин. В его пределах накоплено более 0.5 млн м³ преимущественно твердых отходов III–V классов опасности. Ресурсы полигона выработаны более чем на 80%. Его эксплуатация привела к существенному подъему уровня и загрязнению грунтовых вод, минерализация которых может достигать 12.75 г/л, а жесткость 73.9 ммоль/л. Данные негативные гидрогеоэкологические следствия обусловлены прежде всего усилением атмосферного питания грунтовых вод и активным взаимодействием атмосферных осадков с веществом отходов. На полигоне планируется реконструкция. Предполагается заключение отходов в водонепроницаемый резервуар, ограниченный искусственными геосинтетическими материалами с крайне низкими фильтрационными свойствами. Гидродинамическим и балансовым методами определены: величины инфильтрационного питания грунтовых вод в естественных и нарушенных условиях, производительность подземного дренажа; непрерывно формируемый объем загрязненных подземных вод, не перехватываемый дренажной системой, расход которых составляет 116.7 м³/сут; современный и прогнозный (постреконструкционный) водные балансы. Показано, что планируемая реконструкция должна привести к снижению уровня грунтовых вод и степени их загрязнения. При этом наиболее активно будет происходить снижение концентраций органических веществ, являющихся приоритетными загрязнителями.

Ключевые слова: полигон отходов, загрязнение гидросферы, водный баланс, инфильтрационное питание грунтовых вод, самоочищение подземных вод

DOI: 10.31857/S0869780923030074, EDN: WNAVOL

ВВЕДЕНИЕ

Одна из важнейших мировых геоэкологических проблем — проблема накопления отходов. Наиболее опасными являются радиоактивные отходы и отходы химической промышленности, а наиболее опасными загрязняющими веществами — синтетические органические вещества и тяжелые металлы. Их негативное воздействие на биоту заключается в нарушении процессов обмена веществ, что усугубляется возможностью их интенсивного биоконцентрирования [3, 5].

Крупнейшей нефтехимической компанией Европы является ПАО “Нижнекамскнефтехим”. Предприятие занимает лидирующие позиции по производству синтетических каучуков и пластиков. Первая продукция была получена в 1967 г. В настоящее время ее ежегодный объем в денежном выражении превышает 100 млрд руб. Около половины этой продукции экспортируется [9]. Отходы производства депонируются в пределах шламонакопителя и поверхностного полигона захоронения. Полигон функционирует с 1982 г. Его площадь 25 га (500 × 500 м). Он состоит из 48 карт, с проектными размерами 50 × 70 м и глу-

биной 3–5 м. Противофльтрационным экраном днища карт служит слой уплотненной глины, в единичных картах – бетон. На полигоне захоронено более 0,5 млн м³ промышленных отходов. Это около 250 видов разноагрегатных отходов III–V классов опасности, среди которых преобладают отходы катализаторов, полимерные материалы, нефтешламы. Ежегодное поступление отходов – 37 тыс. м³ (48 тыс. т). По официальным данным соответствующих служб предприятия соотношение твердых, пастообразных и жидких отходов составляет (%) 88–10–2 соответственно. Степень заполненности объекта превышает 80%.

Полигон отходов довольно хорошо оснащен в инженерном плане. Он огорожен бетонным забором и обеспечен круглосуточной охраной. По периметру картового поля располагаются нагорная канава и подземный трубчатый дренаж, по которым дренажные воды самотеком поступают в специальный накопитель, откуда они перекачиваются на биологические очистные сооружения (БОС) предприятия. С северной и южной стороны располагаются противофльтрационные завесы в виде грунтовых глиняных стенок. Перечисленные элементы инженерной системы защиты окружающей среды создавались с конца 1990-х до 2005 гг. В полном объеме они функционируют с 2006 г. Полигон обеспечен двумя поясами наблюдательных скважин, расположенных вокруг него и оборудованных на первый от поверхности водоносный горизонт. Глубина скважин 10 м. Первый пояс непосредственно примыкает к забору, ограничивающему полигон. Он включает 12 скважин. Второй пояс из 20 скважин удален от первого на 150 м.

В ближайшее время будет проведена реконструкция полигона. Она предполагает заключение отходов в водонепроницаемые резервуары. Создание таких резервуаров планируется за счет выемки отходов из большей части уже полностью заполненных карт, установления в их основании противофльтрационного экрана (ПФЭ), обратной засыпки карт их первичным содержимым с планировкой для создания уклонов от центральной части карт к их периферии и, наконец, перекрытия карт ПФЭ и почвенным грунтом с высевом травянистой растительности. В качестве ПФЭ будут использоваться геосинтетические материалы, обладающие крайне низкими фльтрационными свойствами – $(2-5) \times 10^{-11}$ м/с ($(1.7-4.6) \times 10^{-6}$ м/сут). Содержимое части карт перекладываться не будет, такие карты будут только перекрыты верхним ПФЭ. В качестве рабочих планируется оставить 8 карт, в них будет присутствовать только нижний ПФЭ. Поверхностный сток с спланированных и перекрытых ПФЭ карт будет отводиться по специальным лоткам в накопитель дренажных вод и перекачиваться на БОС.

Для удаления газов (метан, водород, углекислый и др.), формирование которых в теле отходов весьма вероятно, и предотвращения нагрева и воспламенения отходов, а также взрывных явлений предполагается сооружение газоотводных труб.

Рассмотрение эффективности существующих инженерных систем защиты полигона, предварительная оценка эффективности планируемых реконструкционных мероприятий и анализ влияния полигона на гидросферу представляют значительный научно-практический интерес.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования явились действующий полигон захоронения промышленных отходов ПАО «Нижнекамскнефтехим», а также поверхностная и подземная гидросфера в его обрамлении.

Полигон расположен в приосевой части залеженного водораздела малых рек (абсолютные отметки 186–199 м), являющихся притоками рек Зай и Кама (урез Камы – 53 м). Ближайшие к полигону объекты – крупное нефтехимическое предприятие, ограничение которого расположено севернее в 300 м, а также два небольших сельских населенных пункта на удалении 3 км в ЮЗ и ЮВ направлениях соответственно. Ориентировка поверхностного и подземного стока – ЮЗ. Высотное превышение полигона над ручьем в районе первой деревни ~100 м. Средний уклон поверхности в этом направлении 0.033. В ЮВ части полигона находится верховье оврага с малодобитным нисходящим родником. Этот овраг спускается к первому из отмеченных населенному пункту. На большем протяжении он характеризуется наличием водного потока.

Верхняя часть разреза сложена платформенными комплексами полигенных пестроцветных карбонатно-терригенных пермских отложений в объеме уржумского и казанского ярусов, перекрытых четвертичными элювиально-делювиальными суглинками мощностью 1–3 м. Основание уржумских отложений залегает на гипсометрическом уровне 160 м. Они в основном представлены переслаиванием глин и тонко-, мелкозернистых песчанников. Мощности отдельных прослоев достигают 3 м. Алевролиты и мергели играют резко подчиненную роль. В основании присутствуют маломощные (до 0.4–0.5 м) прослои глинистых известняков. Образования казанского яруса отличаются четко выраженной ритмичностью. В целом возможно выделение 7 отдельных ритмов (пачек), которые обычно начинаются песчаниками и завершаются карбонатными породами (в верхней части яруса карбонаты могут замещаться глинами). Мощности слоев терригенных

Таблица 1. Породный состав верхней части разреза (%)

Ярус, подъярус	Индекс	Мощность, м	Глины	Песчаники	Известняки
Уржумский	P ₂ ur	42	54	36	10
Верхнеказанский	P ₂ kz ₂	78	67	28	5
Нижеказанский	P ₂ kz ₁	80	80	12	8

пород — до 5 м, редко более, карбонатных — до 2 м. В целом в рассматриваемой части разреза преобладают глинистые породы (табл. 1). В основании казанского яруса залегают “лингуловые глины”, представляющие собой региональный водоупор. Его кровля под полигоном находится на гипсометрическом уровне 2–3 м при мощности — 12–13 м. В охарактеризованной слоистой толще циркулируют межпластовые подземные воды (ПВ), связанные нисходящим перетеканием.

Глубина залегания ПВ первого от поверхности водоносного горизонта в пределах полигона в природных условиях составляла 4–8 м. Данный горизонт локализован в уржумских песчаниках и трещиноватых глинах. ПВ здесь имеют субнапорный характер (далее для удобства они будут именоваться грунтовыми водами). Их уровни располагались на отметках 180–191 м, годовая амплитуда колебаний не превышала 1 м. Уровенная поверхность в сглаженной форме повторяла рельеф. Грунтовый поток был ориентирован в ЮЗ направлении к безымянному ручью. Значения напорного градиента — 0.01–0.03. Уровни нижележащих гидрогеологических подразделений занимали (и занимают сейчас) более низкое положение. Основным источником питания грунтового горизонта в пределах площадки полигона являлись инфильтрация атмосферных осадков и боковой приток ПВ по горизонту со стороны осевой части поверхностного водораздела. Питание нижележащих верхне- и нижеказанского водоносных комплексов происходит за счет нисходящего перетекания и бокового притока по соответствующим водоносным горизонтам также со стороны указанного водораздела. Основной объем разгрузки всех рассматриваемых водоносных горизонтов и комплексов приходится на плановую фильтрацию в ЮЗ направлении, меньшая ее часть — нисходящее перетекание.

Грунтовые воды до начала функционирования полигона характеризовались гидрокарбонатным магниевым-кальциевым составом с минерализацией 0.36–0.44 г/л и жесткостью 4.3–8.2 ммоль/л (типы воды — согласно [6], под жесткостью здесь и далее понимается общая жесткость). Воды верхне- и нижеказанского комплексов имели сходные гидрогеохимические показатели; их основной объем также отличался питьевым качеством. Данные особенности состава определялись исключительно природными факторами. Важней-

шими гидрогеохимическими процессами, контролировавшими состав ПВ, являлись углекислотное выщелачивание и гидролиз карбонатно-терригенных пород.

Район полигона отличается довольно высокой степенью геолого-гидрогеологической изученности. Здесь проведены геологосъемочные работы масштабов 1:200 000 и 1:50 000, эколого-гидрогеологическая съемка масштаба 1:200 000, структурное бурение, поисково-разведочные работы на питьевые ПВ, многочисленные разноплановые тематические работы, а также специализированные исследования непосредственно на площадке полигона и в его ближайшем обрамлении инженерно-геологической, гидрогеологической, геоэкологической и биоэкологической направленности.

Авторы статьи обобщали весь имеющийся материал и составляли гидрогеологические обобщения по полигону в 2012 и 2015 г., небольшая часть этих данных отражена в [4, 13], а также провели дополнительное опробование водопроявлений в его окрестностях с химико-аналитическими исследованиями гидропроб в 2018–2020 гг. (табл. 2).

Максимально широкий спектр проанализированных компонентов и параметров состава вод включает: рН, сухой остаток, жесткость, перманганатную окисляемость, ХПК, БПК, кремнекислоту; ионный состав: HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $(\text{Na} + \text{K})^+$, NH_4^+ ; микрокомпонентный состав: Al, As, B, Ba, Be, Br, Cd, Cu, Co, Cr, F, Fe_{общ}, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Sr, Zn; органические вещества: нефтепродукты, фенолы, формальдегиды, бензол, толуол, ксилол, этилбензол, АСПАВ, CN, HS, у-ГХЦГ, ДДТ, 2,4-Д; α - и β -активность. Необходимо отметить, что постоянный мониторинг за качественным составом подземных и поверхностных вод по наблюдательным скважинам полигона и в его окрестностях ведет аналитическая служба ПАО “Нижекамскнефтехим”. Данные этой службы очень близки данным организаций, отмеченных в табл. 2. Все дальнейшие рассуждения по особенностям и условиям формирования состава природных и природно-техногенных вод базируются на аналитике сторонних организаций и собственных материалах.

Таблица 2. Фактический гидрохимический материал по полигону отходов

Время опробования	Организация	Кол-во проб	Кол-во проанализированных параметров
1977 г.	“Гипрокаучук”, г. Москва	4	9
1992 г.	“Гипрокаучук”, г. Москва	32	9
2004 г.	“Татарстангеология”, г. Казань	24	51
2011 г.	“Стройпроектизыскания”, г. Нижнекамск; “ЭкоЛидер”, г. Казань	30	40
2012 г.	“Экосфера”, “Геолайн”, г. Казань	27	24
2018–2020 гг.	Авторы статьи	22	26

Для решения основных задач авторами были определены:

- величины инфильтрационного питания грунтовых вод в пределах картового поля полигона в естественных и нарушенных условиях;
- производительность дренажной системы полигона;
- объем загрязненных вод, генерируемых полигоном;
- характер, условия формирования и динамика изменения во времени гидрогеохимического поля;
- современный и прогнозный водные балансы;

– гидрогеоэкологические последствия реконструкции.

Величины инфильтрационного питания грунтовых вод определялись на основе анализа гидродинамических сеток потоков по довольно детальным картам гидроизогипс на 01.12.1977 г., 11.12.1991 г. и 23.09.2011 г. (общий характер этих карт довольно сходный, длительная эксплуатация полигона не привела к нарушению генерального Ю–ЮЗ направления тока грунтовых вод). Отдельные гидроизогипсы были определены в качестве “выходных” и “входных” сечений (рис. 1). В каждом сечении были определены расходы потоков на основе закона Дарси:

$$Q = B \times h \times k \times I, \quad (1)$$

где Q – расход потока ($\text{м}^3/\text{сут}$), B – ширина потока (м), h – мощность потока (м), k – коэффициент фильтрации (м/сут), I – напорный градиент (д.е.).

Коэффициенты фильтрации являлись средневзвешенными по мощности для двух преобладающих в разрезе грунтового водоносного горизонта разностей пород – песчаников и глин уржумского яруса. Средние значения их фильтрационной способности на основе многочисленных опытно-фильтрационных работ в виде откачек и наливов, а также лабораторных испытаний, составляют 1.23 и 0.05 м/сут соответственно. Уплотненные глины в связи с широко проявленной трещиноватостью слабодоносные. Величина инфильтрационного питания грунтовых вод (W , м/сут) представляет отношение разницы расходов на “выходном” ($Q_{\text{вых}}$) и “входном” ($Q_{\text{вх}}$) сечениях ($\text{м}^3/\text{сут}$) к площади области фильтрации (F), ограниченной крайними линиями тока подземных вод (м^2):

$$W = \frac{(Q_{\text{вых}} - Q_{\text{вх}})}{F}. \quad (2)$$

Все геометрические характеристики, в том числе B и F в (1) и (2), определялись по топоплану

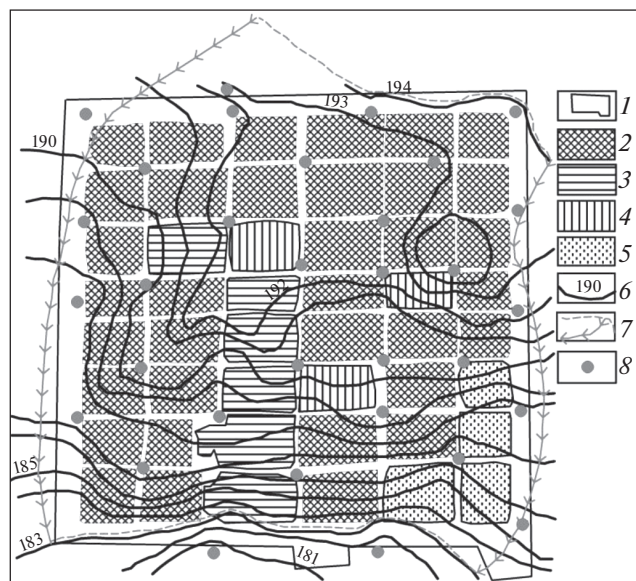


Рис. 1. Карта гидроизогипс на 23.09.2011 г. с линиями тока подземных вод, ограничивающих расчетную область фильтрации: 1 – ограничение полигона; 2–5 – состояние карт на 2015 г.: 2 – заполнены отходами, 3 – заполнены водой, 4 – рабочие, 5 – пустые; 6 – гидроизогипсы и их отметки; 7 – расчетные сечения и линии тока ПВ; 8 – скважины с данными по уровням ПВ.

масштаба 1:500, переоцифрованному авторами в ГИС MapInfo.

Отсутствие надежных данных по величине перекачиваемых дренажных вод из накопителя на БОС предопределило необходимость определения производительности дренажной системы расчетными способами.

Основной элемент *подземного дренажа* — железобетонная труба диаметром 300 мм, уложенная в конусовидную траншею с шириной по низу 1 м, заполненную в нижней 0.5–1.0 м части гранитным щебнем, в средней 2–3 м части — однородным средне- и крупнозернистым песком, а в верхней — местным грунтом. Преобладающая глубина заложения — 4–5 м от земной поверхности и 1.5–2.5 м ниже уровня грунтовых вод (к настоящему времени на большом протяжении уровни грунтовых вод лишь немного превышают отметки основания дренажа). Уклоны дренажных труб — 0.005–0.021. В наиболее эффективно дренируемых частях полигона приток ПВ к трубчатой дрене односторонний. В связи с этим расчет дренажного контура велся по каждой из сторон полигона как однолинейного горизонтального несовершенного дренажа. Полный приток в дренаж определяется так [1, 7, 8, 10]:

$$Q = q \times L, \quad (3)$$

где Q — общий приток ($\text{м}^3/\text{сут}$), q — единичный или удельный односторонний приток ($\text{м}^2/\text{сут}$), L — длина линейного дренажного контура.

Определение единичного расхода проводилось двумя способами. Первый основывается на учете дополнительного (относительно природных значений) инфильтрационного питания [7, 8]:

$$q = w \times l_w, \quad (4)$$

где w — модуль дополнительного инфильтрационного питания ($\text{м}/\text{сут}$), l_w — дальность действия дренажа (м).

Второй способ — использование формулы А.В. Романова [1, 10]:

$$q = \frac{k(h_1 - m)^2}{2R}, \quad (5)$$

где h_1 — мощность водоносного пласта на расстоянии R от дрены (м), R — дальность действия дренажа (м).

Поверхностный дренаж на полигоне представлен нагорной канавой по его периметру. Ее протяженность — 1925 м, ширина по верхней части — 1.2–4.3 м; глубина заложения — 0.3–1.3 м, уклон — 0.012–0.024. Производительность поверхностного дренажа рассчитывалась на основе методики Института гидротехники им. Б.Е. Веденеева [11]. По ней средний многолетний слой годового поверхностного стока определяется через норму осадков:

$$Y = a \times P, \quad (6)$$

где a — коэффициент годового поверхностного стока, индивидуализированный для различных природно-техногенных поверхностей, P — норма осадков ($\text{мм}/\text{год}$, для рассматриваемого района составляет 554.6 $\text{мм}/\text{год}$).

Испарение оценивалось следующим образом [11]:

$$W_{\text{исп.}} = k \times E, \quad (7)$$

где $W_{\text{исп.}}$ — интенсивность испарения ($\text{мм}/\text{год}$), k — коэффициент, индивидуализированный для различных природно-техногенных поверхностей, E — среднегодовое испарение ($\text{мм}/\text{год}$).

Среднегодовое испарение рассчитывается по формуле:

$$E = E_0 \times E/E_0, \quad (8)$$

где E_0 — испаряемость ($\text{мм}/\text{год}$), E/E_0 — относительное испарение.

Испаряемость и относительное испарение для района полигона составляют, соответственно, 600 $\text{мм}/\text{год}$ и 0.7 [11].

Природоохранными сооружениями являются и противофильтрационные завесы (ПФЗ) в виде глиняных стенок в грунте. Они располагаются вдоль северной и южной оконечностей полигона. Их общая длина — 1053 м, ширина по верхней части — 5 м, а по основанию — 2.5 м, глубина заложения по северной части — 5.55–6.0, по южной — 2.3–5.94 м. Коэффициент фильтрации грунтовой стенки на основе лабораторных определений составляет 2×10^{-3} $\text{м}/\text{сут}$. Основное предназначение ПФЗ — ограничение притока грунтовых вод к контуру полигона по его северной периферии и задержка потока загрязненных грунтовых вод по южному ограничению полигона для более эффективного их дренирования располагающейся здесь линией подземного трубчатого дренажа. Эффективность ПФЗ хорошо проявляется при их совместном рассмотрении с дренажными контурами. Если учитывать ПФЗ отдельно, то целесообразно сопоставить удельные расходы грунтовых вод в зоне расположения завес на периоды времени до и после их сооружения. Эти удельные расходы ($\text{м}^2/\text{сут}$) определяются по формуле:

$$q = Q/B, \quad (9)$$

где Q — расход потока, определяемый по (1), B — ширина потока.

Если в природных условиях приходные статьи водного баланса полигона в основном определялись атмосферными осадками, то в настоящее время к ним добавляются жидкие отходы. Величина последних по официальным документам предприятия не очень значительна. При условии равномерного поступления жидких отходов их расход составляет 0.68 $\text{м}^3/\text{сут}$. К ним необходимо

Таблица 3. Изменение во времени инфильтрационного питания грунтовых вод на картовом поле полигона отходов

Период времени	Величина инфильтрационного питания грунтовых вод			
	м/сут	м ³ /сут	мм/год	% от нормы осадков
1975 г.	1.85×10^{-4}	39.49	67.57	12.18
1991 г.	4.06×10^{-4}	86.66	148.29	26.74
2011 г.	5.70×10^{-4}	121.67	208.19	37.54

добавить жидкую субстанцию, которая выделяется при уплотнении пастообразных отходов, влажность которых достигает 40%. В этом случае скорость поступления жидких отходов — 2.44 м³/сут. Скорее всего эти данные также не совсем корректные. Более достоверной оценкой величины жидких отходов представляется значение 20% от всей величины промышленных отходов, размещенных на полигоне. В этом случае расход составит 8.63 м³/сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Функционирование полигона привело к резким изменениям гидрогеодинамических и гидрогеохимических условий прежде всего грунтового горизонта. Уже первые 10 лет эксплуатации привели к подъему уровня грунтовых вод (УГВ) на 1.0–6.5 м, при преобладающих значениях 4.0–4.5 м (подъем УГВ отмечается и в ближайшей к полигону 50–150 м зоне). Примерно такое же распределение гидростатических напоров отмечается и в настоящее время. Направление тока грунтовых вод не претерпело особых изменений, при этом величины напорных градиентов увеличились до 0.02–0.06.

Минерализация грунтовых вод к 1991–1992 гг. участками возросла до 7.7 г/л, а жесткость — до 69.7 ммоль/л, при преобладающем $\text{HCO}_3/\text{Na-Ca}$ составе. В ближайшем обрамлении полигона загрязнение грунтовых вод достигло максимального уровня в 2004 г. до начала работы всего комплекса природоохранных сооружений, когда их минерализация на локальных участках составляла 12.75 г/л, а жесткость — 73.9 ммоль/л. С некоторыми вариациями этот уровень сохраняется до настоящего времени, при этом одними из наиболее характерных компонентов-загрязнителей являются органические вещества, прежде всего нефтепродукты (с концентрациями до 982 мг/л) и фенолы (с содержаниями до 13.9 мг/л). Из неорганических веществ максимальная концентрация отмечена для железа, содержания которого могут достигать 153 мг/л. Наиболее минерализованные воды имеют $\text{Cl-HCO}_3/\text{Na-Ca}$ состав.

Подъем УГВ в пределах полигона и негативная трансформация их качественных характеристик связаны с утечками жидких отходов из карт полиго-

на и, в большей степени, с усилением инфильтрационного питания ПВ. Последнее обусловлено тем, что в пределах полигона изменился режим поверхностного стока, и он, по существу, стал аккумулятором атмосферных осадков. Эти осадки с 1982 г. на площадке полигона могут накапливаться в картах, испаряться и идти на инфильтрацию. Накопление воды в картах ведет к увеличению вертикального напорного градиента, при этом инфильтрация будет только увеличиваться. Свой вклад в этот процесс, естественно, будут оказывать и жидкие отходы. Потенциальной интенсивной инфильтрации способствуют высокое гипсометрическое положение полигона, его “подвешенность” над УГВ (полигон проектировался таким образом, чтобы днища карт располагались в 2–3 м над УГВ; в настоящее время значительная часть карт подтоплена — УГВ превышает отметки днищ карт), а также глинистый характер противофильтрационного экрана днища большей части карт. Водопроницаемость глин увеличивается при их взаимодействии с минерализованными водами, а также при увеличении вертикального напорного градиента [2]. Неблагоприятные изменения качественных характеристик грунтовых вод, в первую очередь, обусловлены взаимодействием атмосферных осадков с веществом отходов. Инфильтрация жидких отходов, в связи с их относительно незначительной величиной, имеет второстепенное значение.

Вывод об усилении инфильтрационного питания грунтовых вод исходит из анализа карт гидроизогипс (табл. 3). Более чем двукратную его интенсификацию через 10 лет от начала эксплуатации полигона можно просто связать с ликвидацией поверхностного стока.

Согласно [11], испарение в природных ландшафтах района полигона составляет 75.7% от нормы осадков. Оставшиеся 24.3% приходятся на поверхностный и подземный сток. Если первый из них ликвидирован, то подземный сток может увеличиться до 24.3% от нормы осадков. В реальности в 1991 г. он составлял 26.74%. Более интенсивное питание в 2011 г. связано со многими факторами: увеличение объема захороненных отходов, в том числе жидких; дозаполнение отходами большей части карт; снижение водоупорных свойств глинистого основания карт. Второй фак-

Таблица 4. Современный и прогнозный (постреконструкционный) водные балансы картового поля полигона отходов

Статьи водного баланса	“Приход” воды, м ³ /сут	“Расход” воды,
		$\frac{\text{м}^3/\text{сут}}{\%}$
Атмосферные осадки	324.12/324.12	
Жидкие промышленные отходы	8.63/8.63	
Испарение		$\frac{184.69}{55.5/41.4(\%)}$
Поверхностный сток		$\frac{5.46}{1.6/22.4(\%)}$
Подземный сток (инфильтрация):		
а) формирующий питание грунтового горизонта;		$\frac{121.67}{36.6(\%)}$
б) формирующий питание верхнеказанского комплекса;		$\frac{8.31}{2.5(\%)}$
в) суммарно		$\frac{129.98}{39.1/29.3(\%)}$
Перекачка воды из карт в водоприемную емкость		$\frac{5.05}{1.5/?(%)}$
Итого	332.75/332.75 100%	325.18/309.86 97.7/93.1 (%)

Примечание. Во второй и третьей графах: в числителе – современные данные, в знаменателе (курсивом) – прогнозные.

тор из указанных трех ведет к уменьшению внутригрунтового и поверхностного испарения. Величина инфильтрационного питания грунтового горизонта в 37.54% от нормы осадков, проявившаяся в 2011 г., представляется максимальной. Скорее всего, такое питание отмечается и в настоящее время.

Базируясь на общих балансовых характеристиках и определениях величин инфильтрационного питания грунтового водоносного горизонта, можно предположительно оценить величину питания ПВ нижележащего верхнеказанского водоносного комплекса. Если принять, что в ненарушенных условиях поверхностный сток составлял – 10% от нормы осадков, испарение – 75.7%, питание грунтового горизонта – 12.2%, то на питание нижележащего верхнеказанского комплекса идет 2.1%. Это 11.57 мм/год или 6.76 м³/сут. В нарушенных условиях за счет усиления питания грунтового горизонта увеличивается его мощность на 20–25%. Это ведет к росту вертикального напорного градиента, связывающего грунтовый горизонт с верхнеказанским комплексом, примерно на такую же величину. Следовательно, питание

последнего возрастает до 8.31 м³/сут. Определение общей величины подземного стока позволяет оценить современный водный баланс полигона (табл. 4).

Разница между приходными и расходными элементами водного баланса в настоящее время идет на заполнение свободных от отходов карт. Превышение интенсивности поступления атмосферных осадков над поступлением жидких отходов более чем в 30 раз однозначно указывает на то, что основной причиной повышения уровня грунтовых вод и их интенсивного загрязнения в пределах полигона является усиление атмосферного инфильтрационного питания ПВ.

Расход грунтовых вод на “выходе” с полигона (рис. 1) составляет 172.7 м³/сут. Особенности их состава по данным опробования наблюдательных скважин первого пояса скважин отмечены в табл. 5 (приведены максимальные значения по отдельным параметрам, которые фиксировались в разное время).

Довольно значительные вариации значений указанных параметров связаны с узкоструйчатый характером распространения загрязнения, обу-

Таблица 5. Особенности состава грунтовых вод по южному ряду наблюдательных скважин первого пояса

Минерализация, мг/л	Жесткость, ммоль/л	Нефтепродукты, мг/л	ХПК, мг O ₂ /л
$\frac{2999-12750}{6076}$	$\frac{9.9-69.84}{39.39}$	$\frac{1.7-131.2}{46.1}$	$\frac{27.2-2912.0}{990.1}$

Примечание. В числителе — предельные значения, в знаменателе — среднее.

словленным разнотипным содержимым смежных карт, что определяет практически индивидуальные характеристики картových фильтратов. В пределах картового поля формируется и относительно глубокий подземный сток, формирующий питание верхнеказанского комплекса. Отсюда постоянно генерируемый объем загрязненных ПВ составляет: $172.7 + 8.31 = 181.01 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Производительность подземного трубчатого дренажа, оцененная балансовым и двумя гидродинамическими методами, варьирует в пределах $51.67-102.67 \text{ м}^3/\text{сут}$. Наиболее достоверным, оптимально отвечающим сложившимся природно-техногенным условиям, является значение $73.97 \text{ м}^3/\text{сут}$, полученное на основе формулы Романова. Оно складывается из следующих притоков ($\text{м}^3/\text{сут}$): по северной стороне — 9.66; восточной — 4.32; южной — 46.57; западной — 13.42. Можно считать, что северная дренажная линия перехватывает относительно чистые подземные воды, на которые полигон не оказывает негативного воздействия. В этом случае перехватываемый сток загрязненных грунтовых вод —

$64.31 \text{ м}^3/\text{сут}$ ($67.95 \text{ м}^3/\text{сут}$ при использовании уравнения, учитывающего дополнительное инфильтрационное питание), а не перехватываемый постоянно генерируемый загрязненный подземный сток: $181.01 - 64.31 = 116.7 \text{ м}^3/\text{сут}$ (1.35 л/с).

Функционирование с 2006 г. всех защитных инженерных сооружений на полигоне привело к тому, что уровни грунтовых вод в 2011 г. в сравнении с 1991 г. практически не изменились, несмотря на усиление их инфильтрационного питания, а в районах северной и южной дренажных линий они даже снизились и в настоящее время по южной стороне особо не отличаются от положения уровней в ненарушенных условиях (рис. 2).

Все дополнительное питание в $35.01 \text{ м}^3/\text{сут}$ перехватывается подземным дренажом. Эти данные наглядно свидетельствуют об эффективности защитных сооружений, особенно по южному флангу полигона, где трубчатый дренаж ориентирован ортогонально линиям тока грунтовых вод. Перехват загрязненных грунтовых вод был бы более масштабным при более глубоком заложении трубчатой дрены. По северной окраине полигона защитные инженерные элементы не столь эффективны. Производительность дренажной линии здесь — $9.66 \text{ м}^3/\text{сут}$, а ПФЗ снижает удельный расход грунтовых вод лишь на $0.01 \text{ м}^2/\text{сут}$ в сравнении с ненарушенными условиями и на $0.04 \text{ м}^2/\text{сут}$ в сравнении с нарушенными условиями во временном интервале до создания дренажей и ПФЗ.

Не перехватываемый дренажной системой, загрязненный картowymi фильтратами поток грунтовых вод после выхода с полигона начинает самоочищаться. Свидетельством этого является снижение концентраций практически всех компонентов в интервале между 1-м и 2-м поясами наблюдательных скважин. Снижение может достигать одного порядка, реже более. Самоочищению грунтовых вод способствуют следующие основные процессы: разбавление относительно чистым атмосферным питанием (минимальное значение в виде слоя воды — 67.57 мм/год); хеми- и биодеструкция органических веществ, являющихся основными контаминантами; сорбция, диффузионно-дисперсионное рассеяние, выпа-

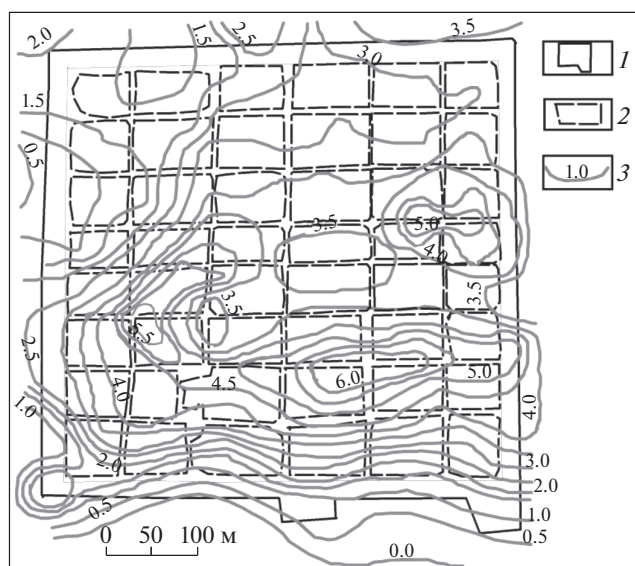


Рис. 2. Превышение уровней грунтовых вод в 2011 г. над их положением в ненарушенных условиях: 1 — ограничение полигона; 2 — контуры карт; 3 — изолинии разницы уровней.

Таблица 6. Наиболее вероятный баланс инфильтрационного питания подземных вод в пределах картового поля полигона

Инфильтрационное питание	Суммарная величина, м ³ /сут	Тип поверхности формирования инфильтрационного питания		
		Грунтовые перемычки между картами	Закрытые (заполненные) карты	Открытые (рабочие и свободные) карты
Современное	129.98	16.01 (12.3%)	76.17 (58.6%)	37.8 (29.1%)
После реконструкции	97.46	95.58 (98.1%)	1.26 (1.3%)	0.62 (0.6%)

дение в осадок по мере изменения рН–Еh условий.

Самоочищение приводит к тому, что на расстоянии 1.0–1.5 км от полигона по направлению фильтрационного потока поверхностные и родниковые воды не несут следов загрязнения, вызванных деятельностью полигона (примерно на такое же расстояние отмечается негативное влияние на гидросферу крупных полигонов твердых бытовых отходов [12]). Глубинный подземный сток – 8.31 м³/сут, питающий в пределах картового поля верхнеказанский комплекс, за счет разбавления чистыми водами с минерализацией не более 0.6 г/л, расход которых на восточной границе полигона составляет 112.5 м³/сут, также не должен вызывать существенных гидрогеоэкологических проблем.

Органическая природа значительной части отходов предопределяет повышенную углекислотную агрессивность картовых фильтратов, которая отражается высокими содержаниями гидрокарбонат-ионов. Концентрация НСО₃⁻ в грунтовых водах полигона при их минерализации 12.75 г/л достигает 8.17 г/л. Это возможно лишь при повышенной парциальной активности углекислого газа, формирующегося за счет деструкции органического вещества отходов. Высокая углекислотная агрессивность определяет более интенсивное взаимодействие картовых фильтратов и самих грунтовых вод в пределах полигона с вмещающим минеральным матриксом и более активное выщелачивание большей части анализировавшихся неорганических компонентов. Интересно и закономерно, что по мере удаления от полигона наиболее интенсивно снижаются концентрации гидрокарбонатов и органических веществ, где последние тесно скоррелированы. Более подробно особенности загрязнения и поведения отдельных компонентов отражены в [4, 13].

Наиболее вероятный водный баланс в постреконструкционном будущем полигона определялся, исходя из типов будущих поверхностей, их площадей, уклонов и коэффициентов фильтрации, необходимых для расчетного определения испарения, поверхностного и подземного стока (см. табл. 4). Со временем должен существенно увели-

читься поверхностный сток (это сток с крайних снелированных карт и внутрисекторных автодорог, который будет перехватываться дренажными лотками). Подземный сток уменьшится на 32.52 м³/сут (довольно высокая величина прогнозной инфильтрации исходит из условия отсутствия системы поверхностного дренажа по периферии внутренних спланированных карт, при наличии такого дренажа инфильтрация может быть сокращена до 30.48 м³/сут, т.е. до более низкого уровня в сравнении с природными условиями (см. табл. 3)). Это сокращение на 32.52 м³/сут в виде слоя воды составляет 1.52×10^{-4} м/сут или 5.56×10^{-2} м/год.

Эффективная скважность пород зоны аэрации и грунтового водоносного горизонта – 0.1. За 5 лет указанный слой может дать величину снижения напора в бассейновых условиях 2.78 м, наиболее вероятные значения в существующих условиях – 1.5–2.0 м. Такое снижение скорее всего приведет к прекращению работы подземного дренажа и осушению большей части подтопленных карт. Предположительно, днища всех карт станут располагаться выше УГВ через 7 постреконструкционных лет.

Проведение реконструкции скажется не только на положении уровня грунтовых вод, но и на их качестве, так как основной уровень современной инфильтрации проходит непосредственно через карты с отходами, а будущая инфильтрация будет осуществляться через грунтовые перемычки между картами (табл. 6).

Такое питание начнет приводить к постепенному очищению грунтовых вод – снижению их минерализации, общей жесткости, концентраций нефтепродуктов, фенолов и всех остальных компонентов-загрязнителей, так как на грунтовых перемычках может отмечаться лишь сравнительно небольшой объем загрязняющих веществ, присутствующий на них за счет пыления отходов, размещаемых в картах.

Авторы попытались оценить средневзвешенный по расходу состав грунтовых вод на выходе с полигона после проведения реконструкции, базируясь на расходах и наиболее вероятном составе разнотипных вод, смешение которых происхо-

Таблица 7. Сопоставление составов грунтовых вод на выходе с полигона

Временные этапы	Минерализация, мг/л	Жесткость, ммоль/л	Нефтепродукты, мг/л	Фенолы, мг/л	ХПК, мг О ₂ /л
Современный	$\frac{368-3824}{1684}$	$\frac{5.0-69.8}{19.0-39.0}$	$\frac{0.074-131.2}{10.1-46.1}$	$\frac{0.01-2.25}{0.46-0.8}$	$\frac{27.2-3883}{1251-1314}$
Постреконструк- ционное будущее	558.1	8.03	6.38	0.07	151.1

Примечание. Современные данные — по опробованию наблюдательных скважин первого пояса; в числителе — предельные значения, в знаменателе — среднее или преобладающие значения.

дит в картовом поле полигона (грунтовые воды на входном сечении полигона, картовые фильтраты, воды, проинфильтровавшиеся через грунтовые перемычки) (табл. 7).

В постреконструкционном будущем грунтовые воды на выходе с полигона будут отличаться сверхнормативными концентрациями в основном органических веществ. Но они могут быть снижены на порядок в сравнении с современным уровнем содержаний. Это положительно скажется и на гидрогеоэкологических условиях ближайшего обрамления полигона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время все большее внимание уделяется отходам и полигонам их размещения. Основная цель — уменьшение объема отходов и минимизация их негативного влияния на окружающую среду. Рассмотренный в статье полигон захоронения промышленных отходов в скором времени должен выработать свой ресурс. Его полное заполнение и оставление в существующем виде приведут к сохранению довольно крупного источника загрязнения атмосферы, гидросферы и педосферы на длительный срок, исчисляемый сотнями лет.

Проведение планируемой реконструкции полигона, проект которой разработан в ПИ “Союзхимпромпроект” (г. Казань), позволит минимизировать его негативное влияние на окружающую среду. Влияние на гидросферу, скорее всего, не будет распространяться более чем на 0.5 км от ограничения полигона по направлению тока ПВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов С.К. Подземные дренажи в промышленном и городском строительстве. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1973. 280 с.
2. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Недра, 1986. 160 с.
3. Красилов В.А. Охрана природы: принципы, проблемы, приоритеты. М.: Ин-т охраны природы и заповед. дела, 1992. 172 с.
4. Мусин Р.Х., Курлянов Н.А., Калкаманова З.Г. О буферных свойствах подземной гидросферы в районах полигонов промышленных отходов // Сергеевские чтения. “Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи”. М.: РУДН, 2016. Вып. 18. С. 520–525.
5. Небел Б. Наука об окружающей среде: Как устроен мир. В 2-х т. Т. 1. Пер. с англ. М.: Мир, 1993. 424 с.
6. Отраслевой стандарт. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. М.: ВСЕГИНГЕО, 1986. 12 с.
7. Прогноз и предотвращение подтопления грунтовыми водами территорий при строительстве / Под ред. С.К. Абрамова. М.: Стройиздат, 1978. 176 с.
8. Пособие к СНиП 2.06.15-85. Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях. М.: Стройиздат, 1991. 272 с.
9. Сайт ПАО “Нижнекамскнефтехим”. URL: <https://www.nknh.ru/> (дата обращения 01.12.2022).
10. Справочное руководство гидрогеолога: в 2 т. 3-е изд., перераб. и доп. Т. 1 / Под ред. В.М. Максимова. Л.: Недра, 1979. 512 с.
11. СТП ВНИИГ 210.01.НТ-2010. Методика расчета гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий. СПб.: ВНИИГ, 2010. 114 с.
12. Экологические функции литосферы / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2000. 432 с.
13. Musin R.Kh., Kurlyanov N.A., Kalkamanova Z.G., Korotchenko T.V. Environmental state and buffering properties of underground hydrosphere in waste landfill site of the largest petrochemical companies in Europe // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 33. No. 012019.

FEATURES OF THE STRUCTURE, FUNCTIONING AND RECONSTRUCTION OF THE LANDFILL NIZHNEKAMSKNEFTEKHIM PUBLIC JOINT STOCK Co.

R. Kh. Musin^{a, #}, A. R. Galieva^{a, ##}, and N. A. Kurlyanov^{b, ###}

^aKazan Federal University (KFU),
Kremlevskaya ul. 18, Kazan, 420008 Russia

^bLLP "Ecostandard "Technical Solutions",
Perevedenovskii per. 13, Moscow, 105082 Russia

[#]E-mail: Rustam.Musin@kpfu.ru

^{##}E-mail: abdullina_albina94@mail.ru

^{###}E-mail: nikitakurlyanov@gmail.com

PJSC Nizhnekamskneftekhim is one of the largest petrochemical companies in Europe. Industrial production was launched there in 1967. Production waste is stored in a sludge reservoir and waste landfill. The landfill has been operating since 1982. It is equipped with systems of surface and underground drainage, impervious curtains, and two belts of observation wells. More than 0.5 million m³ of mostly solid waste III-V classes of hazard has been accumulated there. The landfill capacity is depleted by more than 80%. Its operation has led to a significant groundwater level rise (4.0–4.5 m) and groundwater pollution, the water salinity reaching 12.75 g/l, and hardness, 73.9 mmol/l. These negative hydrogeoeological effects are primarily due to increased atmospheric recharge of groundwater and the active interaction of atmospheric precipitation with the waste substance. There is plan to reconstruct the landfill. It involves encapsulating the waste in a watertight reservoir confined by artificial geosynthetic materials with extremely low filtration properties. Hydrodynamic and balance methods were used to determine the infiltration supply of groundwater in natural and disturbed conditions, productivity of underground drainage; the continuously formed flow rate of polluted groundwater, which is not intercepted by drainage system (with the flow discharge equal to 116.7 m³/day); as well as modern and predicted (postreconstruction) water balances. The effectiveness of the existing engineering protective structures of the landfill was assessed. It is shown that the planned reconstruction should lead to a decrease in the groundwater level and its pollution degree. In this case, the concentrations of organic substances, which are the priority pollutants, will decrease most intensely. The geological environment of the landfill site is characterized by significant buffer (protective) properties. They control just local spreading of contaminated groundwater. According to the data of numerous different-time sampling at a distance of 1.0–1.5 km from the landfill in the direction of groundwater current spreading, no signs of pollution caused by the landfill operation are registered. The main processes determining the self-purification of groundwater are as follows: dilution of polluted water by pure infiltration nutrition, the minimum layer of which is 67.6 mm/year; chemo- and biodestruction of pollutants, their sorption, diffusion-dispersion scattering and precipitation as pH–Eh conditions change.

Keywords: landfill, pollution of the hydrosphere, water balance, infiltration recharge of groundwater, self-purification of groundwater

REFERENCES

1. Abramov, S.K. *Podzemnye drenazhi v promyshlennom i gorodskom stroitel'stve* [Underground drainage in industrial and urban construction]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1973, 280 p. (in Russian)
2. Gol'dberg, V.M., Skvortsov, N.P. *Pronitsaemost' i fil'tratsiya v glinakh* [Permeability and filtration in clays]. Moscow, Nedra Publ., 1986, 160 p. (in Russian)
3. Krasilov, V.A. *Okhrana prirody: printsipy, problemy, priority* [Nature conservation: principles, problems, priorities]. Moscow, Institute of nature conservation and nature reserves, 1992, 172 p. (in Russian)
4. Musin, R.Kh., Kurlyanov, N.A., Kalkamanova Z.G. *O bufernykh svoystvakh podzemnoi gidrosfery v raionakh poligonov promyshlennykh otkhodov* [On the buffering properties of the underground hydrosphere in the areas of industrial waste landfills]. *Sergeevskie chteniya. Inzhenernaya geologiya i geoekologiya. Fundamentalnye problemy i prikladnye zadachi*. [Sergeev Readings. Engineering Geology and Geoecology. Fundamental problems and applied tasks]. Moscow, RUDN Publ., 2016, issue 18, pp. 520–525. (in Russian)
5. Nebel, B. *Nauka ob okruzhayushchei srede: kak ustroen mir?* [Environmental science: How does the world work?]. Moscow, Mir Publ., 1993, vol. 1, 424 p. (in Russian)
6. *Otraslevoi standart. Vody podzemnye. Klassifikatsiya po khimicheskomu sostavu i temperature* [Industry Standard. Groundwater. Classification by chemical composition and temperature]. Moscow, Vsesengeo Publ., 1986, 12 p. (in Russian).

7. *Prognoz i predotvrashchenie podtopleniya gruntovymi vodami territorii pri stroitel'stve* [Forecasting and prevention of groundwater flooding of areas during construction]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1978, 176 p. (in Russian).
8. *Prognozy podtopleniya i raschet drenazhnykh system na zastraiyaemykh i zastroyennykh territoriyakh. Sprav. posobie k SNiP* [Forecasts of flooding and calculation of drainage systems in the built-up and building areas. Reference Manual to SNiP]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1991, 272 p. (in Russian).
9. *Sait PAO "Nizhnekamskneftekhim"* [Website of PJSC "Nizhnekamskneftekhim"]. Available at: <https://www.nknh.ru/> (accessed 01.12.2022).
10. *Spravochnoe rukovodstvo gidrogeologa* [Hydrogeologist's Reference Guide]. Moscow, Nedra Publ., 1979, vol. 1, 512 p. (in Russian).
11. *STP VNIIG 210.01.NT-2010. Metodika rascheta gidrologicheskikh kharakteristik tekhnogenno-nagruzhennykh territorii* [Company standard 210.01.NT-2010. Calculation methodology of hydrological characteristics of technogenic-loaded territories]. St. Petersburg, VNIIG Publ., 2010, 114 p. (in Russian).
12. *Ehkologicheskie funktsii litosfery* [Ecological functions of the lithosphere]. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2000, 432 p. (in Russian).
13. Musin, R.Kh., Kurlyanov, N.A., Kalkamanova, Z.G., Korotchenko, T.V. Environmental state and buffering properties of underground hydrosphere in waste landfill site of the largest petrochemical companies in Europe // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016, vol. 33, no. 12019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012019>