

Научная статья

УДК 556.3: 628.477 (470.5)

DOI: 10.31084/2619-0087/2023-3-10

## ЗАЩИТА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛИГОНА ТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ

**Р. Ф. Абдрахманов, А. О. Полева**

*Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН),  
450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2, hydro@ufaras.ru*

Проблема защиты подземных пресных вод от воздействия твердых бытовых и жидких промышленных отходов, содержащих токсичные и особотоксичные вещества первого и второго класса опасности рассматриваются на примере Уфимского городского полигона твердых бытовых отходов и жидких промышленных стоков. На основе математических расчетов разработана фильтрационная модель полигона. Показана возможность защиты Южного водозабора г. Уфы от загрязнения созданием горизонтального и вертикального дренажа перехвата сточных вод, а также строительством водохранилища для сбора стоков и утилизации их на очистных сооружениях в аварийных случаях.

*Ключевые слова:* полигон токсичных отходов, подземные воды, загрязнение, математическое моделирование, защитное сооружение

*Благодарности:* Работы выполнены по теме FMRS-2022–0013.

Original article

## PROTECTION OF GROUNDWATER FROM THE NEGATIVE IMPACT OF A TOXIC WASTE POLYGON

**R. F. Abdrakhmanov, A. O. Poleva**

*Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), K. Marx St., 16/2, Ufa, Russia, 450077, hydro@ufaras.ru*

The problem of protecting underground fresh water from the effects of solid household and liquid industrial waste containing toxic and highly toxic substances of the first and second hazard class is considered on the example of the Ufa municipal landfill of solid household waste and liquid industrial effluents. Based on the mathematical calculations, the filtration model of the polygon has been developed. The possibility of protecting the Southern water intake of Ufa city from pollution by creating horizontal and vertical drainage of wastewater interception, as well as the construction of a reservoir for collecting wastewater and disposing of it at sewage treatment plants in emergency cases is shown.

*Keywords:* toxic waste landfill, groundwater, pollution, mathematical modeling, protective structure

*Acknowledgements:* the work was carried out within the framework of the Theme No. FMRS-2022–0013.

---

**Для цитирования:** Р. Ф. Абдрахманов, А. О. Полева. Защита подземных вод от негативного воздействия полигона токсичных отходов // Геологический вестник. 2023. №3. С. 130–140. DOI: 10.31084/2619-0087/2023-3-10

**For citation:** R. F. Abdrakhmanov, A. O. Poleva. (2023) Protection of groundwater from the negative impact of a toxic waste polygon. *Geologicheskii vestnik*. 2023. No. 3. P. 130–140. DOI: 10.31084/2619-0087/2023-3-10

---

© Р. Ф. Абдрахманов, А. О. Полева, 2023

## Введение

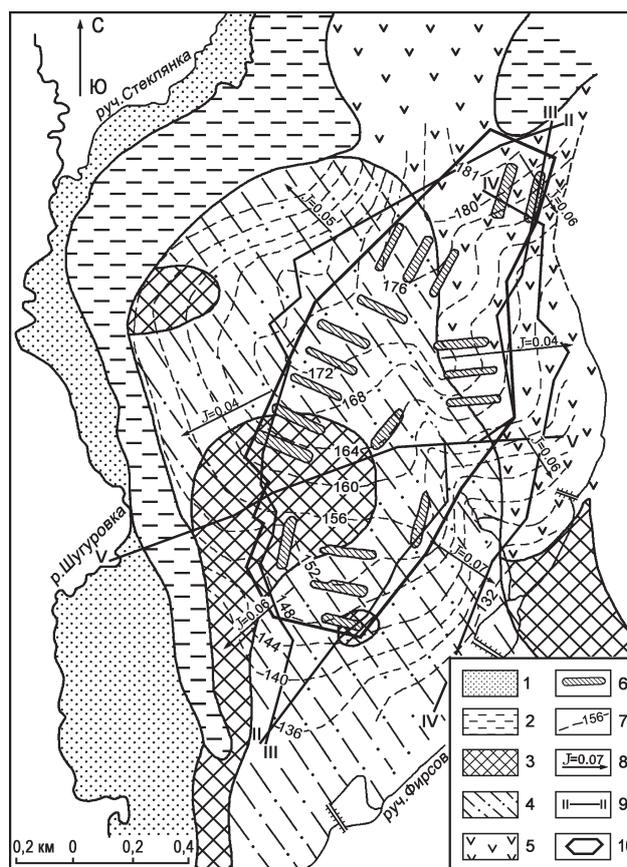
Урбанизация, ухудшающая экологическое состояние среды, приводит к накоплению громадных объемов твердых бытовых отходов (ТБО) и жидких промышленных стоков и утилизации их на полигонах и в прудах-накопителях. В настоящее время эколого-геохимический аспект изучается во всех развитых странах, где это влияние приняло уже угрожающий характер.

Из всего многообразия отходов, образующихся в городе, основной экологический ущерб наносится промышленными и аналогичными им производственными отходами, среди которых выделяется значительный объем токсичных и особо токсичных компонентов. Полиэлементные очаги свалочных масс, нестационарность их составов и свойств, широкий диапазон объема образования обуславливает сложность решения проблемы их обработки и утилизации [Зайнуллин и др., 1997; Злобина и др., 2021; Крайнов и др., 2012; Babalola, Busu, 2011; Kontos et al., 2005]. Как отмечают С. Р. Крайнов и др. [Крайнов и др., 2012] наиболее изучены в России в настоящее время подземные воды в районах свалок Башкортостана и особенно г. Уфы [Зайнуллин и др., 1997].

Большая часть коммунально-бытовых отходов г. Уфы относящихся к I-IV классам токсичности складировается на городском полигоне отходов. Проблема защиты пресных подземных вод от воздействия промышленных и хозяйственно-бытовых отходов представляет собой важную и сложную экологическую проблему. Влияние Уфимского полигона ТБО вместе с другими промышленными отходами в северной части г. Уфы определяет химический состав реки Шугуровка, впадающей в р. Уфу. Ниже по течению р. Уфы расположен Южный инфильтрационный водозабор, обеспечивающий водой южную часть г. Уфы [Зайнуллин и др., 1997].

## Объект исследований

Полигон утилизации отходов расположен (рис. 1) в северной части г. Уфы в пределах так называемого «Уфимского полуострова» (Бельско-Уфимская водораздельная равнина). Полигон с запада и северо-запада ограничен р. Шугуровка и её левым притоком руч. Стеглянка, а с востока и юго-востока — руч. Фирсов (левый приток р. Шугуровка). Абсолютные отметки колеблются от 80–85 м (урезы рек Белая и Уфа) до 116–130 м



**Рис. 1. Схема распространения подземных вод в пределах полигона утилизации отходов г. Уфы**

Условные обозначения: 1 — водоносный горизонт в аллювиальных четвертичных отложениях; 2 — водоносный комплекс в уфимских отложениях; 3–5 — воды спорадического распространения: 3 — грунтовые воды в четвертичных делювиальных отложениях, 4 — в общесыртовых отложениях, 5 — в уфимских отложениях; 6 — старые пруды-накопители (битумные ямы); 7 — гидроизогипсы (м); 8 — гидравлические уклоны грунтовых вод; 9 — линия гидрогеологического разреза; 10 — граница защитных мероприятий.

**Fig. 1. Scheme of groundwater distribution within the Ufa waste disposal site**

Legend: 1 — aquifer in alluvial Quaternary deposits; 2 — aquifer in the Ufa deposits; 3–5 — sporadic waters: 3 — groundwater in Quaternary deluvial deposits, 4 — in general syrt deposits, 5 — in Ufa deposits; 6 — storage ponds for industrial wastewater; 7 — hydroisohypses (m); 8 — hydraulic slopes of groundwater; 9 — line of the hydrogeological section; 10 — boundary of protective measures.

(урезы рек Шугуровка, Стеглянка, Фирсов), 142 м (урез нижнего пруда (2) — накопителя стоков) и 187 м (урез верхнего пруда-накопителя (1) дренажных вод). Полигон бытовых отходов находится на отметках 165–171 м.

Полигон эксплуатируется с 1962 года, куда вывозится около 70% отходов г. Уфы, застроен без выполнения защитных противофильтраци-

онных мероприятий. Он расположен на месте утилизации отходов ОАО «Уфахимпром», бывших битумных ям АО «Уфимский нефтеперерабатывающий завод» и других химических предприятий. Территория, занимаемая полигоном утилизации ТБО и жидких промышленных отходов, составляет свыше 100 га. Полигон условно разделен на 4 зоны: на первую и вторую зоны, где складировались бытовые отходы вперемешку с промышленными отходами, на промышленную зону (третью) куда завозятся промышленные отходы, четвертая зона — старые захоронения промышленных отходов и стоков.

Гидрогеологические условия участка полигона изучены до глубины 100–108 м. Они характеризуются развитием подземных вод в трех основных (четвертичных, неогеновых и уфимских) водоносных горизонтах. Кунгурские отложения являются региональным водоупором (рис. 2). Воды в четвертичных насыпных грунтах ( $Q_4$ ) и неоген-четвертичных (общесыртовых) песчано-глинистых ( $N_2^3 - Q_1$ ) отложениях безнапорные, грунтового типа, глубина залегания до 4.1 м, характеризуются Кф от 0.01 до 1.5 м/сут. В неогеновых ( $N_2, kn$ ) глинистых образованиях водоносны песчаные слои, глины имеют Кф 0.009 м/сут. В уфимских отложениях ( $P_1, ss, P_1, sl$ ), характеризующихся сложным фаціальным составом пород, водоносны известняки, мергели. Водоносный горизонт разделяется на отдельные водоносные слои аргиллитоподобными глинами, что определяет его напорность (см. рис. 2). Выполненные нами исследования [Зайнуллин и др., 1997] территории полигона показывают, что грунтовые воды имеют сложный химический состав: хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатный, гидрокарбонатно-хлоридный, хлоридный магниевый-кальциевый, кальциевый-натриевый, аммонийно-натриевый. Тип воды (по О. А. Алекину — Е. В. Посохову [Алекин, 1970; Посохов, 1975]) изменяется от I (гидрокарбонатного натриевого), II (сульфатного натриевого) до III а (хлормагниевого) и III б (хлоркальциевого), одновременно возрастает минерализация подземных вод от 0.4 до 13.2 г/дм<sup>3</sup>. При этом увеличивается содержание хлор-иона от 16–44 до 1700–3021 мг/дм<sup>3</sup>. Отмечены высокие концентрации нитратов (30.3–63.8 мг/дм<sup>3</sup>), аммония (до 1160 мг/дм<sup>3</sup>), нефтепродуктов (от 0.04 до 10.4 мг/дм<sup>3</sup>), фенолов (до 0.3 мг/дм<sup>3</sup>), бенз/а/пи-

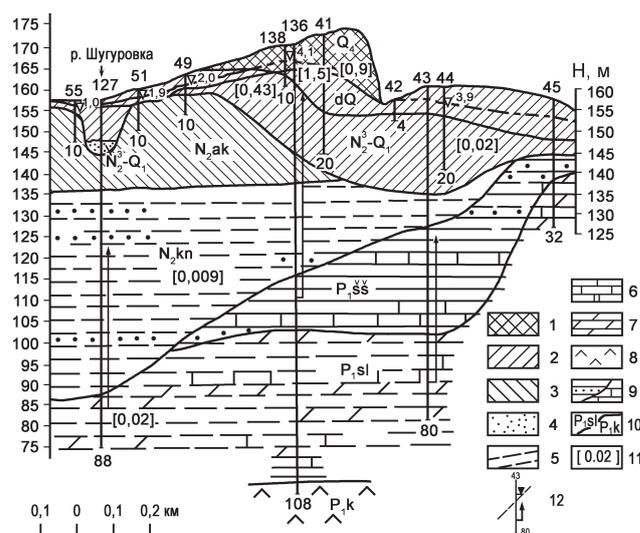


Рис. 2. Гидрогеологический разрез по линии V-V

Условные обозначения: 1–8 — водоносные породы: 1 — насыпной грунт, 2 — суглинки, 3 — глины, 4 — пески, песчаники, 5 — глины аргиллитоподобные, 6 — известняки, доломиты, 7 — мергели, 8 — гипсы; 9 — литологическая граница; 10 — гидростратиграфическая граница; 11 — коэффициент фильтрации пород (м/сут); 12 — скважина: наверху — номер по первоисточнику, внизу — глубина скважины, справа — штрихами показан уровень грунтовых вод, стрелка соответствует напору вод.

Fig. 2. Hydrogeological section along the V-V line

Legend: 1–8 — aquifers: 1 — bulk soil, 2 — loams, 3 — clays, 4 — sands, sandstones, 5 — mudstone-like clays, 6 — limestones, dolomites, 7 — marls, 8 — gypsum; 9 — lithological boundary; 10 — hydrostratigraphic boundary; 11 — rock filtration coefficient (m/day); 12 — well: at the top — the number according to the source, below — the depth of the well, on the right — the dashes show the level of groundwater, the arrow corresponds to the pressure of the water.

рена (2.7–42.6 нг/дм<sup>3</sup>), тяжелых металлов, диоксинов. На территории полигона содержание тяжелых металлов в воде колеблется (мг/дм<sup>3</sup>): меди 0.006–27.9, свинца 0.05–9.4, кадмия 0.0003–1.29, цинка 0.04–63.6, железа от 0.2 до 420.8–2540, марганца 0.05–31.6, хрома 0.02–15.3. Диоксины — чрезвычайно экологически опасные вещества и являются типоморфными компонентами районов полигонов утилизации отходов [Крайнов и др., 2012; Сафаров, 2000]. По нашим данным [Абдрахманова, 2019] суммарное содержание диоксинов в грунтовых водах на полигоне от 1050 до 18570 пг/дм<sup>3</sup><sup>1</sup>, в том числе 2,3,7,8-ТХДД (полихлорированных дибензо-п-диоксинов) — от 250 до 1450 пг/дм<sup>3</sup>. Кроме того, суммарное содержание полихлорированных

<sup>1</sup> Максимально допустимое содержание диоксинов в питьевых водах, принятое в России в 1991 г. (приказ Минздрава № 142–9/105 от 5.06.91) составляет 20 пг/дм<sup>3</sup> (до 1991 г. — 0.26, а в США — 0.013 пг/дм<sup>3</sup>) [Федоров, 1993]. ПДК для бенз/а/пирена 5 нг/дм<sup>3</sup>, фенола — 0.001 мг/дм<sup>3</sup>, нефтепродуктов — 0.1 мг/дм<sup>3</sup>, других компонентов (мг/дм<sup>3</sup>): NO<sub>3</sub>–45, NH<sub>4</sub>–0.5, Cl — 350, Cu — 1.0, Pb — 0.03, Cd — 0.01 Zn — 5.0, Fe — 0.1, Mn — 0.1, Cr 0.05.

дибензофуранов (ТХДФ) — от 1050 до 6720 пг/дм<sup>3</sup>, в том числе токсичных 2,3,7,8-ТХДФ от 250 до 900 пг/дм<sup>3</sup>. Высокие концентрации диоксинов, фенолов, тяжелых металлов отмечаются и в горных породах, заключающих подземные воды. В суглинках и глинах суммарное содержание ТХДФ на глубине 2 м достигает 12330 нг/кг, а наиболее токсичных 2,3,7,8-ТХДД — 2530–7540 нг/кг. На глубине 4 м концентрация 2,3,7,8-ТХДД составляет 500 нг/кг, а суммарное содержание ТХДД — 1510 нг/кг. Концентрации металлов изменяется также с глубиной (мг/кг) меди от 9191–500 (глубина 2–3 м) до 46.0 (5 м) и до 28 (16 м), свинца соответственно — 296–18.5, кадмия — 27.78–0.6, ртути — 2.8–0.04 [Абдрахманов, 2019; Зайнуллин и др., 1997].

В геологической среде г. Уфы появление особо токсичных химических соединений (диоксинов) было связано с крупнейшим не только в России, но и в мире производством хлорсодержащих гербицидов 2,4,5-Т и 2,4-Д существовавшим в ОАО “Уфахимпром”. Диоксины сильно абсорбируются грунтами, где они, благодаря химической стабильности к биоразложению, могут сохраняться в течение многих лет. Период полураспада в почве наиболее токсичных 2,3,7,8-ТХДД составляет 10–20 лет, причем он считается сильно заниженным [Федоров, 1993].

Анализ соотношения уровней подземных вод в этажнорасположенных горизонтах четвертичного, неогенового и пермского возраста свидетельствует о тенденциях нисходящих перетоков через слабопроницаемые (глинистые) слои, гидрогеологические “окна” преимущественно литолого-фациального происхождения. Величины вертикальных градиентов фильтрации изменяются от 0.1 (южная часть) до 1.5–2 (центральная и северная часть). Как уже ранее отмечалось нами [Абдрахманов, 2018; Попов, Абдрахманов, 2013] и другими авторами [Блох, 1969; Гольдберг, Скворцов, 1986; Осипов, Соколов, 2013 и др.], глинистые отложения при фильтрации различных стоков не являются надежным экраном под основаниями. Поэтому при моделировании фильтрационных перетоков через эти отложения, их надо рассматривать как проницаемые слои.

Вертикальный переток загрязненных грунтовых вод в уфимский водоносный комплекс колеблется от 0.1 до 3.0 м<sup>3</sup>/сут. Он, в первую очередь, определяется высокими градиентами фильтрации (до 2) и позволяет проникать супертоксикантам на глубину до 100 м, вплоть до регионального водоупора. В подобной ситуации не исключаются дальние латеральные переносы загрязняющих

веществ в трещиноватых и закарстованных уфимских и кунгурских отложениях до р. Шугуровка и р. Уфа.

Оценка времени достижения загрязняющих веществ с поверхности земли до уровня грунтовых вод рассчитывалась по формуле В. М. Шестакова [Шестаков, 1979]:

$$t = \frac{m \cdot \mu}{\sqrt[3]{\left(\frac{Q}{F}\right)^2 \cdot K}}$$

где  $m$  — мощность зоны аэрации, м;  $\mu$  — дефицит влажности (0.1);  $Q$  — инфильтрационное питание, м<sup>3</sup>/сут.;  $F$  — площадь на которой происходит инфильтрация, м<sup>2</sup>;  $K$  — коэффициент фильтрации пород зоны аэрации, м/сут.; отношение  $Q/F$  — это слой ( $h$ ) инфильтрующихся осадков, мм.

Среднемноголетнее годовое количество осадков 1% обеспеченности по станции Уфа составляет 769 мм, а испарение — 439 мм. Слой осадков ( $h$ ) за год составляет 330 мм (769–439), а в сутки равен  $(330:365) \cdot 0.904$  мм/сут = 0.0009 м/сут.

Следует отметить, что основное питание грунтовых вод происходит в теплое время года (с апреля по октябрь), в холодное время (с ноября по март) питание уменьшается на 30–40%.

Расчет времени достижения загрязняющих веществ до уровня грунтовых вод, выполненный на IBM PC показал, что для различных точек территории свалки он не превышает 200 суток. Судя по карте гидроизогипис и линиям тока (см. рис. 1), разгрузка грунтовых вод происходит в основном в ручей Фирсов. Дальность растекания стоков по потоку определяли по формуле:

$$X = R_{cb} \cdot \left( \sqrt{1 + Q_{cb} \cdot t / 3.14 \cdot n_a \cdot m \cdot R_{cb}^2} - 1 \right) + V_c \cdot t / n,$$

где  $R_{cb}$  — радиус хранилища стоков, м;  $Q_{cb}$  — расход стоков на инфильтрацию, м<sup>3</sup>/сут.;  $t$  — расчетное время растекания стоков (3650 сут., то есть 10 лет);  $n_a$  — активная пористость водоносных пород (0.35);  $m$  — средняя мощность горизонта грунтовых вод, м (10);  $V_c$  — скорость движения грунтовых вод, м/сут (0.008) ( $V_c = I \cdot K$ , где  $I$  — уклон подземного потока, определенный по карте гидроизогипис,  $K$  — средневзвешенный коэффициент фильтрации на пути грунтового потока). ( $V_c = I \times K$ , где  $I$  — уклон подземного потока, определенный по карте гидроизогипис,  $K$  — средневзвешенный коэффициент фильтрации на пути грунтового потока).

$$R_{cb} = \sqrt{a^2 + b^2},$$

где  $a$  — длина свалки (1575 м);  $b$  — ширина свалки (800 м).

$$R_{св} = \sqrt{1575^2 + 800^2} = 1766 \text{ м.}$$

$$Q_{св} = Q = h \cdot F,$$

где  $h = 0.0009 \text{ м/сут.}$

$$F = \pi \cdot R_{св}^2 = 3.14 \cdot 1766^2 = 9792894 \text{ м}^2.$$

Следовательно

$$Q_{св} = 0.0009 \times 9792894 = 8814 \text{ м}^3/\text{сут.},$$

$$t = 3650 \text{ сут.}, n_a = 0.35, m_{ср} = 10 \text{ м}, V_e = 0.04 \times 0.2 = 0.008 \text{ м/сут.}$$

Дальность растекания

$$X = 1766 \cdot \left( \sqrt{1 + 8814 \cdot \frac{3650}{3.14} \cdot 0.35 \cdot 10 \cdot 1766^2 - 1} \right) + 0.008 \cdot \frac{3650}{0.35} = 775 \text{ м.}$$

Таким образом, перенос загрязнения грунтовым потоком происходит за 10 лет на 775 м. Исходя из того, что складирование промышленных и бытовых отходов производится уже около 60 лет, а расстояние мест складирования до ручья Фирсов составляет 300–500 м, можно считать, что загрязнение уже достигло дрен.

Влияние полигона на реки Шугуровка и Уфа проявляется в основном через ручей Фирсов. Годовой объем стока с территории объекта (соответствующий годовой сумме осадков) достигает следующих значений: при 1%-ой обеспеченности — 234 тыс. м<sup>3</sup>, 5%-ой — 214 тыс. м<sup>3</sup> и 10%-ой — 204 тыс. м<sup>3</sup>.

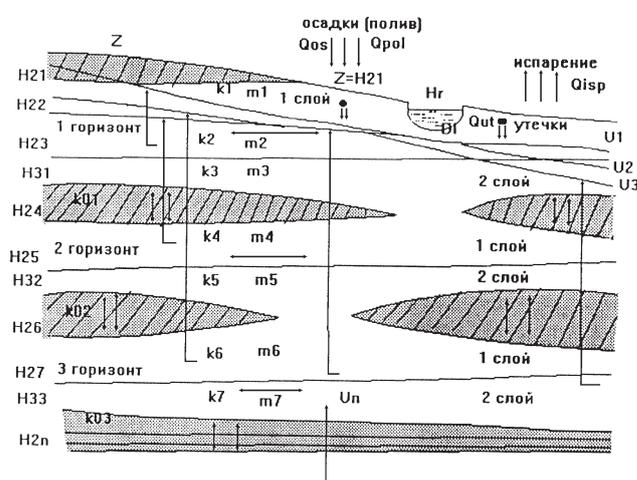
Из годового объема осадков, выпавших на массив полигона бытовых отходов в условиях складирования, по схеме выравнивания: 70% стока приходится на испарение, 15% составляет фильтрат и 15% — поверхностный сток.

Основная часть территории полигона по степени устойчивости и карстовым процессам [Зайнуллин и др., 1997] относится к относительно устойчивым (5 категория: карстовые полости в толще гипсов отсутствуют, глубина залегания кровли карстующихся пород более 60 м). Обрамляющие полигон участки (см. рис. 1) относятся к категории несколько пониженной устойчивости (4 категория). На склонах долин рек Шугуровка, Стеглянка, Фирсов выделяются небольшие участки, относящиеся к категориям недостаточной устойчивости, неустойчивой и очень неустойчивой (3, 2, 1 категории).

## Методы исследования

Исследуемая природно-техногенная геофильтрационная система (ПТГС) представляет собой совокупность параметрически интерпретированных метеорологических, гидрографических и гидрогеологических условий, направленности взаимосвязи поверхностных и грунтовых вод и их испарения, взаимодействие которых приводит к соответствующим уровенному, гидродинамическому и водобалансовому режимам (табл. 1–3).

Модели построены по принципу отражения их состава и структуры. В таблицах приводятся основные требования, предъявляемые к принципиальному представлению состава и структуры полного комплекса расчетно-схематизированных



**Рис. 3. Схема потоков подземных вод района Уфимского полигона**

Условные обозначения:

где  $m_j$  — максимальное количество слоев в каждом водоносном горизонте;  
 $k_{j,i}$  — коэффициенты фильтрации  $i$ -го слоя водоносного горизонта, м/сут;  
 $H2_{j,i}$  — абсолютные отметки поверхностей раздела слоев в  $j$ -том водоносном горизонте, м;  
 $H3_j$  — абсолютные отметки подошвы  $j$ -го водоносного горизонта, м;  
 $U_j$  — абсолютные отметки уровней подземных вод  $j$ -го водоносного горизонта, м;  
 $Q_j$  — интенсивность инфильтрации влаги, участвующей в перетоках, м/сут.

**Fig. 3. Scheme of groundwater flows in the area of the Ufimsky polygon**

Legend: where  $m_j$  is the maximum number of layers in each aquifer;  $k_{j,i}$  — filtration coefficients of the  $i$ -th layer of the aquifer, m/day;  $H2_{j,i}$  — absolute elevations of the interfaces between layers in the  $j$ -th aquifer, m;  $H3_j$  — absolute marks of the base of the  $j$ -th aquifer, m;  $U_j$  — absolute marks of groundwater levels of the  $j$ -th aquifer, m;  $Q_j$  is the intensity of moisture infiltration involved in the overflows, m/day.

Таблица 1. Модель расчетно-схематизированных параметрически интерпретированных метеорологических условий [Зайнуллин и др., 1997]

Table 1. Model of calculation-schematized parametrically interpreted meteorological conditions [Zajnullin et al., 1997]

№ п/п	Состав		Структура			
	Характеристические показатели	Параметрически интерпретируемые сведения	Для ПТГС взаимодействия			
			Исходно наблюдаемое	Прогнозируемое		
1	Метеоэлементы	1.1. Температура воздуха	Выделение периодов с отрицательными и положительными температурами	Соответственно то же самое с использованием месячных и годовых значений по всем пунктам наблюдений за годы 50, 10, 5 и 1% обеспеченности		
		1.2. Атмосферные осадки			Площадное распределение суммарных величин	
		1.3. Снежный покров	Площадное распределение среднесуточных величин для периода преобладания испарения над атмосферными осадками			
		1.4. Дефицит влажности				
		1.5. Испарение с водной поверхности				
		1.6. Испарение с поверхности почвы				
			1.7. Испарение с уровня грунтовых вод			
			1.8. Промерзание почвы		Выделение временного периода	

Таблица 2. Модель расчетно-схематизированных параметрически интерпретированных гидрографических условий [Зайнуллин и др., 1997]

Table 2. Model of calculation-schematized parametrically interpreted hydrographic conditions [Zajnullin et al., 1997]

№ п/п	Состав		Структура	
	Характеристические показатели	Параметрически интерпретируемые сведения	Для ПТГС взаимодействия	
			Исходно наблюдаемое	Прогнозируемое
1	Топология водотоков, водоемов, затапливаемых пойменных участков, ирригационных каналов, овражно-балочной сети	1.1. Конфигурация	Плановые контуры с учетом их непрерывного изменения в течение наблюдаемого периода	Соответственно то же самое с использованием динамики их трансформации при строительном освоении, инженерной подготовке и благоустройстве территории, а также изменений уровней воды на затапливаемых поймах, месячных и годовых значений по всем пунктам наблюдений за годы 50, 10, 5 и 1% обеспеченности
2	Морфометрия линейных водотоков, водоемов, затапливаемых пойменных участков	2.1. Ширина и поперечное сечение водотоков	Распределение по длине линейных водотоков и по площади водоемов и затапливаемых пойменных площадей с учетом изменения во времени, а для фильтрационных подрусловых отложений с диапазонными вариациями	
		2.2. Абсолютные отметки дна		
3	Гидравлика линейных водотоков, водоемов, затапливаемых пойменных участков	3.2. Расходы воды родников		
		3.3. Фильтрационные сопротивления подрусловых отложений		

Таблица 3. Модель расчетно-схематизированных параметрически интерпретированных гидрогеологических условий [Зайнуллин и др., 1997]

Table 3. Model of calculation-schematized parametrically interpreted hydrogeological conditions [Zajnullin et al., 1997]

№ п/п	Состав		Структура	
	Характеристические показатели	Параметрически интерпретируемые сведения	Для ПТГС взаимодействия	
			Исходно наблюдаемое	Прогнозируемое
1	2	3	4	5
1	Структурное строение водовмещающей толщи	1.1. Площади, занимаемые водоносными горизонтами (с учетом их слоистости), разделяющими слабопроницаемыми отложениями	Плановые контуры с учетом их непрерывного изменения в течение наблюдаемого взаимодействия	Плановые контуры с учетом динамики их трансформации при строительном освоении территорий
		1.2. Абсолютные отметки подошвы (кровли) водоносных горизонтов (слоев) и разделяющих толщ		
2	Расчетные параметры водовмещающих отложений (водоносных горизонтов с учетом слоев и слабопроницаемых прослоев)	2.1. Мощность	Визуализация в виде комплекса карт с соответствующими интерполяционными моделями либо зонами абсолютных отметок уровней, напоров — для серии временных периодов, расчетных параметров — с диапазонными вариациями	
2		2.2. Коэффициенты фильтрации		
		2.3. Коэффициенты водопроницаемости		
		2.4. Коэффициенты свободной (упругой) водоотдачи, уровня и пьезопроницаемости		
3	Напорность водоносных горизонтов	3.1. Абсолютные отметки уровней грунтовых и межпластовых подземных вод в безнапорных водоносных горизонтах		
		3.2. Абсолютные отметки напоров подземных вод		
4	Геофильтрационный режим	4.1. Установившиеся (постоянные во времени) абсолютные отметки уровней грунтовых и межпластовых подземных вод		
		4.2. Неустановившиеся (переменные во времени) абсолютные отметки уровней грунтовых и межпластовых подземных вод		

параметрически интерпретированных моделей, входящих в расчетно-схематизированные природно-техногенные геофильтрационные системы формирования исходно-наблюдаемого и прогнозируемого экологически неблагоприятного взаимодействия полигона с подземной гидросферой, а также результаты численно-графической визуализации этих моделей. Гидродинамические особенности потока подземных вод показаны на рис. 3.

### Результаты исследований

Не останавливаясь на деталях модели, которые занимают большой объем сложных математических расчетов [Зайнуллин и др., 1997] отметим только, что результаты моделирования позволили разработать систему защитных мероприятий для предотвращения загрязнения подземных и поверхностных вод, которая включает два вида дренажа: горизонтальный и вертикальный (рис. 4).

**Горизонтальный дренаж** (по контуру полигона) необходим для предотвращения растекания загрязненных грунтовых вод за пределы территории полигона. В то же время, горизонтальные дрены, расположенные кольцом вокруг полигона, не исключают вертикальную фильтрацию, а, следовательно, загрязнение нижележащих водоносных горизонтов. Суммарный переток грунтовых вод 1%-ой обеспеченности в нижележащие водоносные горизонты в пределах территории полигона без защитных мероприятий и при работе горизонтального дренажа соответственно составляет  $101 \text{ м}^3/\text{сут.}$  и  $88 \text{ м}^3/\text{сут.}$

**Вертикальный дренаж** предлагается для исключения транзитного растекания за пределы территории полигона вод уфимского комплекса, загрязненных вследствие вертикальной фильтрации грунтовых вод. Вертикальные дренажные скважины, размещенные за контуром полигона, исключают растекание загрязненных подземных вод за пределы полигона путем формирования депрессионной воронки в уфимском водоносном комплексе.

Проектируемые дренажные скважины должны работать с постоянным напором, либо с постоянным дебитом. В начале работы они распределяются во всех блоках по контуру полигона. Скважины, в которых отсутствует водоприток за счет взаимовлияния формирующихся вокруг них депрессионных воронок, перестают работать и программным способом отключаются. При достижении установившегося геофильтрационного режима места размещения и количество оставшихся

скважин принимается в качестве оптимизированных, а расходы оцениваются как стабильно гарантированные. Оценка эффективности защиты подземных и поверхностных вод от загрязняющего влияния полигона ТБО производится:

- при работе горизонтального дренажа;
- при работе вертикального «кольцевого» дренажа.

**Оценка эффективности горизонтального дренажа** в  $P_1$  и водоносном горизонте производится для горизонтального совершенного дренажа, проложенного по контуру полигона и прорезающего

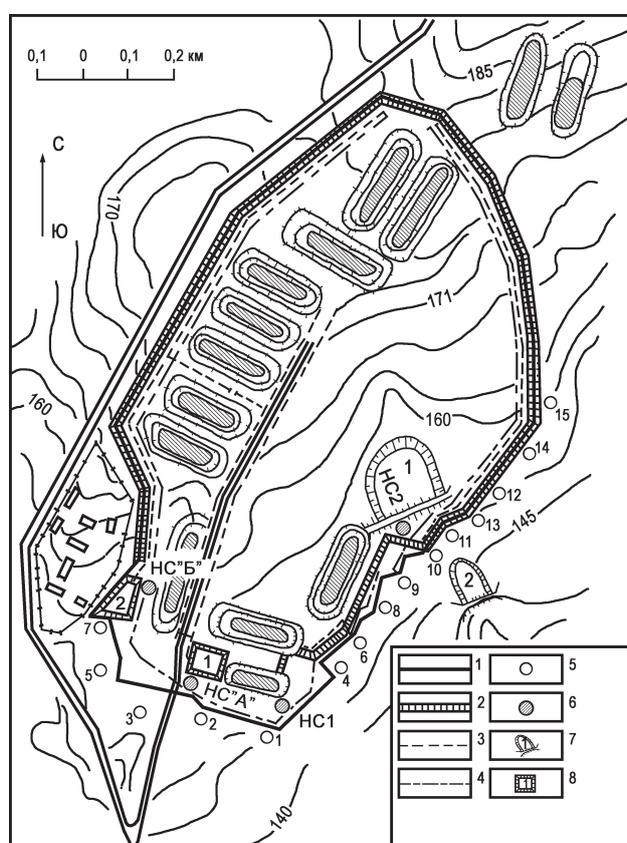


Рис. 4. Инженерные сооружения перехвата сточных вод [Зайнуллин и др., 1997]

Условные обозначения: 1 — противофильтрационный экран; 2 — дамба обвалования; 3 — открытая ливневая сеть; 4 — горизонтальный трубчатый дренаж; 5 — вертикальный дренаж; 6 — насосные станции; 7 — существующие пруды-накопители (1 — верхний, 2 — нижний); 8 — проектируемые пруды-накопители.

Fig. 4. Engineering structures for the interception of wastewater [Zajnullin et al., 1997]

Legend: 1 — impervious screen; 2 — embankment dam; 3 — open storm network; 4 — horizontal tubular drainage; 5 — vertical drainage; 6 — pumping stations; 7 — existing drainage water storage ponds (1 — upper pond, 2 — lower pond); 8 — designed storage ponds.

четвертичный водоносный горизонт с частичным углублением в водоупорную толщу.

Абсолютные отметки уровней грунтовых вод 1%-ой обеспеченности на прилегающей к полигону территории и на самом полигоне колеблются от 120 до 195 м. Направление потока грунтовых вод 1%-ой обеспеченности практически совпадает с рельефом местности.

Сработка уровня грунтовых вод 1%-ой обеспеченности в динамике изменения режимобразующих факторов при работе горизонтального дренажа в течение одного года составляет 1 м в центре полигона и до 7 м вблизи горизонтальных дренажей. Суточный расход воды по всему горизонтальному дренажу в период атмосферных осадков 1%-ой обеспеченности (без «ливневки») составляет 1495 м<sup>3</sup>/сут.

Данная схема дренажа исключает транзитное растекание грунтовых вод за пределы территории полигона, что предотвращает загрязнение грунтовых и поверхностных вод за его контуром.

Суммарный переток грунтовых вод 1%-ой обеспеченности в нижележащие водоносные горизонты при работе горизонтального дренажа снизится до 88 м<sup>3</sup>/сут.

**Оценка эффективности вертикального «кольцевого» дренажа** производится для дренажной системы, состоящей из 15 скважин с суммарным дебитом 2290 м<sup>3</sup>/сут., расположенных кольцом, охватывающим городской полигон ТБО.

Мощность перекрывающего их водоупора колеблется от 6.0 до 71.0 м. Абсолютные отметки уровня подземных вод 1%-ой обеспеченности уфимского водоносного комплекса под самим полигоном и прилегающих территориях составят от 112.0 до 176.0 м, кунгурского — 104.0–167.0 м.

Расчеты параметров дренажных скважин производятся при заданном напоре на каждую скважину. При данных параметрах и местоположениях скважин достигается:

а) исключение транзитного растекания за пределы территории полигона подземных вод уфимских отложений, загрязненных вследствие нисходящей вертикальной фильтрации грунтовых вод;

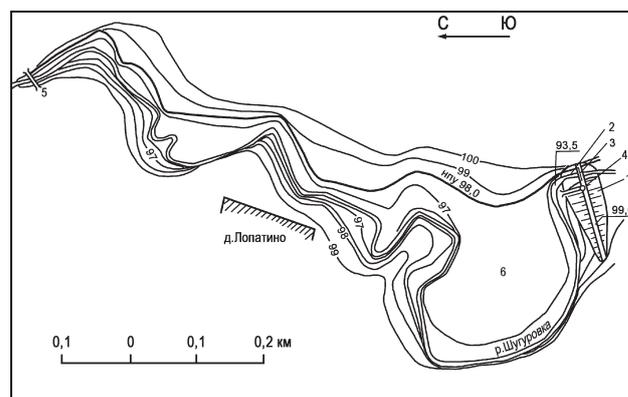
б) формирование депрессионной воронки в уфимском водоносном комплексе и установление в пределах ее напоров ниже напоров подземных вод кунгурского яруса. Понижение уровня подземных вод уфимского яруса под полигоном составит 2–5 м, кунгурского яруса — 0.35–1.4 м.

Река Шугуровка (правый приток р. Уфы) является основным собирателем сточных вод хими-

ческих, нефтехимических и других предприятий северной части города, а также загрязненных поверхностных и подземных вод, поступающих с территории Уфимского городского полигона ТБО. В период чрезвычайного происшествия весной 1990 г., которое имело место на «южном» водозаборе г. Уфы, содержание фенолов, в воде р. Шугуровка достигало 26.3 г/дм<sup>3</sup> [Сафаров, 2000]. Тогда предполагалось, что водопродовная вода загрязнена только соединениями фенола, оказалось, что проблема более сложная, в воде присутствовало десятки высокотоксичных отходов — диоксины, бен/з/апирен и др. Подобные чрезвычайные происшествия в меньших или больших масштабах в бассейне р. Шугуровка происходят уже десятки лет. Они не исключаются и в последующие годы.

**Следующим этапом** своевременного перехвата и защиты «южного» водозабора г. Уфы, расположенного на р. Уфа в 20 км ниже устья р. Шугуровка, от попадания загрязненных вод высокотоксичными компонентами при чрезвычайных происшествиях (переполнение и прорывы прудов-накопителей) необходимо создание гидротехнического сооружения на р. Шугуровка в створе с. Лопатино (рис. 5). Общая длина р. Шугуровка к створу — 15 км, водосборная площадь 95 км<sup>2</sup>, среднемноголетний расход 0.54 м<sup>3</sup>/с (максимальный — 43, а минимальный 0.22 м<sup>3</sup>/с).

Намечается земляная плотина с уположенным верховым откосом высотой 6 м с плоским двухри-



**Рис. 5. Проектируемое гидротехническое сооружение на р. Шугуровка**

Условные обозначения: 1 — тело плотины; 2 — водосбросной канал; 3 — двухригельный затвор; 4 — насосная станция; 5 — Тимашевский мост; 6 — чаша пруда.

**Fig. 5. Designed hydrotechnical structure on the river Shugurovka**

Legend: 1 — dam body; 2 — spillway channel; 3 — two-bar shutter; 4 — pumping station; 5 — Timashevsky bridge; 6 — pond bowl.

гельным затвором, обеспечивающем быстрое перекрытие р. Шугуровки в случае аварийных выбросов. В остальное время затвор открытый, пропускающий весь сток реки. При максимальном расходе весеннего половодья 5%-ой обеспеченности пруд с расчетным напором 5.5 м (объем пруда 370 тыс. м<sup>3</sup>, площадь зеркала 14.5 га) заполняется за 4 часа. Накопленная вода с помощью насосной станции отводится на очистные сооружения.

### Заключение

Реализация данного проекта позволит в значительной степени уменьшить техногенную нагрузку на экологическое состояние подземных вод бассейнов р. Шугуровки и, в конечном счете, нижнего течения р. Уфы, где расположен один из основных инфильтрационных водозаборов г. Уфы.

### Список литературы

- Абрахманов Р. Ф. Фильтрационные свойства неоген-четвертичных глинистых отложений и изменение их под влиянием техногенеза // Геологический вестник. 2018. № 2. С. 118–124. Doi: 10.31084/2619–0087/2018-2-9
- Абрахманов Р. Ф. Гидрогеохимия урбанизированных территорий Южного Предуралья // Геохимия. 2019. Т. 64, № 7. С. 733–741. Doi: 10.31857/S0016-7525647733-741
- Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 442 с.
- Блох А. М. Структура воды и геологические процессы. М.: Недра, 1969. 216 с.
- Гольдберг В. М., Скворцов Н. П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Недра, 1986. 160 с.
- Зайнуллин Х. Н., Абрахманов Р. Ф., Савичев Н. А. Утилизация промышленных и бытовых отходов (на примере Уфимской городской свалки). Уфа: УНЦ РАН, 1997. 235 с.
- Злобина В. Л., Медовар Ю. А., Юшманов И. О. Оценка опасности загрязнения окружающей среды свалками промышленных и коммунальных отходов // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 3. С. 315–321.
- Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Швец В. М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 672 с.
- Осипов В. И., Соколов В. Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
- Попов В. Г., Абрахманов Р. Ф. Ионнообменная концепция в генетической гидрогеохимии. Уфа: Гилем, 2013. 356 с.
- Посохов Е. В. Общая гидрогеохимия. Л.: Недра, Ленингр. отд., 1975. 208 с.
- Сафаров М. Г. Люди и диоксины. М.: Химия, 2000. 167 с.
- Федоров Л. А. Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы. М.: Наука, 1993. 266 с.

Шестаков В. М. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1979. 368 с.

Babalola A., Busu I. Selection of Landfill Sites for Solid Waste Treatment in Damaturu Town-Using GIS Techniques // J. Environ. Protection. 2011. V. 2. P. 1–10.

Kontos T. D., Komilis D. P., Halvadakis C. P. Siting MSW Landfills with a Spatial Multiple Criteria Analysis Methodology // Waste Management. 2005. Vol. 25, № 8. P. 818–832. Doi: 10.1016/j.wasman.2005.04.002

### References

- Abdrakhmanov R. F. (2018). Fil'tratsionnyye svoystva neogen-chetvertichnykh glinistykh otlozheniy i izmeneniye ikh pod vliyaniem tekhnogeneza [Filtration properties of Neogene-Quaternary clay deposits and their change under the influence of technogenesis]. *Geologicheskii vestnik*, № 2, p. 118–124. Doi: 10.31084/2619–0087/2018-2-9 (in Russian).
- Abdrakhmanov R. F. (2019). Hidrogeokhimiya urbanizirovannykh territorii Yuzhnogo Predural'ya [Hydrogeochemistry of Urban Territories in the Southern Fore-Ural Areas]. *Geokhimiya*, vol. 64, № 7, p. 812–820. Doi: 10.31857/S0016-7525647733-741 (in Russian).
- Alekin O. A. (1970). *Osnovy gidrokhimii* [Principles of Hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 442 p. (In Russian).
- Bloch A. M. (1969). *Struktura vody i geologicheskie processy* [Water structure and geological processes]. Moscow: Nedra Publ., 216 p. (In Russian).
- Gol'dberg V. M., Skvorcov N. P. (1986). *Pronicaemost' i fil'traciya v glinah* [Permeability and filtration in clays]. Moscow: Nedra Publ., 160 p. (In Russian).
- Zajnullin H. N., Abdrakhmanov R. F., Savichev N. A. (1997). *Utilizaciya promyshlennykh i bytovykh othodov (na primere Ufimskoj gorodskoj svalki)* [Utilization of industrial and domestic waste (the municipal landfill site in Ufa taken as an example)]. Ufa Sci. Ctr., Rus. Acad. Sci., 235 p. (In Russian).
- Zlobina V. L., Medovar Y. A., Yushmanov I. O. (2021). Otsenka opasnosti zagryazneniya okruzhayushchei sredy svalkami promyshlennykh i kommunal'nykh otkhodov [Assessing the hazard of environmental pollution by landfills of industrial and municipal wasters]. *Vodnye resursy*, vol. 48, № 3, p. 420–426. (In Russian).
- Krainov S. R., Ryzhenko B. N., Shvets V. M. (2012). *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i jeologicheskie aspekty* [Geochemistry of Groundwaters. Theoretical, Applied, and Ecological Aspects]. Moscow: TsentrLitNefteGas Publ., 672 p. (In Russian).
- Osipov V. I., Sokolov V. N. (2013). *Gliny i ikh svoystva. Sostav, stroeniye i formirovaniye svojstv* [Clays and Their Properties. Composition, structure, and formation of properties]. Moscow: GEOS Publ., 576 p. (In Russian).
- Popov V. G., Abdrakhmanov R. F. (2013). *Ionoobmennaya koncepciya v geneticheskoy gidrogeokhimii* [Ion Exchange Concept in Genetic Hydrogeochemistry]. Ufa: Gilem Publ., 356 p. (In Russian).

Posokhov E. V. (1975). *Obshhaja gidrogeohimija* [General Hydrogeochemistry]. Leningrad: Nedra Publ., 208 p. (In Russian).

Safarov M. G. (2000). *Ljudi i dioksiny* [People and dioxins]. Moscow, Himija Publ., 167 p. (In Russian).

Fedorov L. A. (1993). *Dioksiny kak jekologicheskaja opasnost': retrospektiva i perspektivy* [Dioxines as Ecological Hazard: Retrospective View and Prospects]. Moscow: Nauka Publ., 266 p. (In Russian).

Shestakov V. M. (1979). *Dinamika podzemnyh vod* [Groundwater dynamics]. Moscow: MSU Publ., 368 p. (In Russian).

Babalola A., Busu I. (2011). Selection of Landfill Sites for Solid Waste Treatment in Damaturu Town-Using GIS Techniques. *J. Environ. Protection*, vol. 2, p. 1–10.

Kontos T. D., Komilis D. P., Halvadakis C. P. (2005). Siting MSW Landfills with a Spatial Multiple Criteria Analysis Methodology. *Waste Management*, vol. 25, № 8, p. 818–832. Doi: 10.1016/j.wasman.2005.04.002

*Сведения об авторах:*

**Абдрахманов Рафил Фазылович**, доктор геол.-минер. наук, профессор, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. hydro@ufaras.ru

**Полева Александра Олеговна**, кандидат биологических наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. hydro@ufaras.ru

*About the authors:*

**Abdrakhmanov Rafil Fazilovich**, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. hydro@ufaras.ru

**Poleva Aleksandra Olegovna**, candidate of biological sciences Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. hydro@ufaras.ru

Статья поступила в редакцию 15.08.2023; одобрена после рецензирования 04.09.2023; принята к публикации 10.11.2023

The article was submitted 15.08.2023; approved after reviewing 04.09.2023; accepted for publication 10.11.2023