



Моделирование экспозиции при поступлении химических веществ с водой с учетом замещения незначимых значений концентраций

Е. В. Дроздова

Научно-исследовательский институт гигиены, токсикологии, эпидемиологии, вирусологии и микробиологии
ГУ «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья», г. Минск, Беларусь

Резюме

Цель исследования. Научно обосновать методические подходы к моделированию хронической экспозиции при поступлении химических веществ с питьевой водой с учетом замещения незначимых значений концентраций, полученных в лабораторных исследованиях.

Материалы и методы. На основании результатов лабораторных исследований проб питьевой воды на 3 плотных водопроводах проведены расчет экспозиции и оценка рисков здоровью по 6 вариантам замещения незначимых значений концентраций и проанализирован их удельный вклад в формирование итоговых значений параметров рисков.

Результаты. При различных вариантах моделирования вклад замещающих значений в формирование коэффициента суммации составлял от 8,5 до 89,3 %, индекса опасности — от 1,9 до 63,3 %, комбинированного риска развития хронических неспецифических токсических эффектов — от 1,9 до 59,5 %, индивидуального суммарного канцерогенного риска — от 46,7 до 100 %.

Заключение. Чувствительность методов исследования может оказывать существенное влияние на качество проводимых оценок риска здоровью населения от воздействия внешнесредовых факторов риска. При оценке экспозиции от воздействия комплекса потенциальных загрязнителей питьевой воды целесообразно использовать дифференцированный подход моделирования экспозиции, учитывающий 4 базовых критерия при замещении незначимых значений концентраций: чувствительность метода исследований и доля проб с количественным определением, профиль рисков загрязнителя (канцерогенный потенциал, способность к кумуляции, отдаленные эффекты) и его приоритетность для изучаемой территории (на основе многолетнего профиля внешнесредовых рисков и тенденций). Предложен и апробирован алгоритм замещения незначимых значений концентраций с учетом сложившихся в республике условий водопользования. Его применение рационально и позволит усовершенствовать методические подходы к оценке хронической экспозиции, при этом избежать значительной переоценки уровней экспозиции без снижения качества и надежности проводимых оценок риска здоровью населения, позволяя сконцентрировать меры по минимизации рисков здоровью на наиболее приоритетных аспектах.

Ключевые слова: *питьевая вода, концентрации, моделирование экспозиции, замещающие значения, незначимые значения, оценка риска здоровью*

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Источники финансирования. Работа представляет собой обобщение и систематизацию результатов выполненных оценок риска здоровью населения от воздействия химических веществ, поступающих с водой, в том числе в рамках заданий 01.01. «Разработать метод гигиенической оценки летучих химических веществ в питьевой воде» и 01.03. «Научно обосновать и внедрить метод интегральной оценки рисков здоровью, ассоциированных с водопользованием», подпрограммы «Безопасность среды обитания человека» ГНТП «Научно-техническое обеспечение качества и доступности медицинских услуг», 2021–2025 гг. (рег. № НИОКР 20190177, 20190341), «Научно обосновать и разработать метод оценки формирования дополнительных случаев заболеваемости и смертности населения от загрязнения воздуха жилых помещений, атмосферного воздуха населенных пунктов и питьевой воды» Плана научных исследований и разработок общегосударственного отраслевого назначения, направленных на научно-техническое обеспечение деятельности Министерства здравоохранения Республики Беларусь на 2022 г. (рег. № НИОКР 20220606).

Для цитирования: Дроздова ЕВ. Моделирование экспозиции при поступлении химических веществ с водой с учетом замещения незначимых значений концентраций. Проблемы здоровья и экологии. 2024;21(4):120–134. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2024-21-4-13>

Modeling of waterborne chemicals exposure with substitution of insignificant values of concentrations

Alena V. Drazdova

Research Institute of Hygiene, Toxicology, Epidemiology, Virology and Microbiology of the State Institution
Republican Center for Hygiene, Epidemiology and Public Health, Minsk, Belarus

Abstract

Objective. To scientifically substantiate methodological approaches to modeling of chronic exposure to chemicals with drinking water, taking into account the substitution of insignificant values of concentrations obtained in laboratory testing.

Materials and methods. Exposure calculation and health risk assessment for 6 variants of substitution of concentrations insignificant values were carried out, the specific contribution of substituted insignificant values to the formation of the final values of risk parameters was analyzed based on the results of laboratory tests of drinking water samples at 3 pilot water pipelines.

Results. Under different modeling variants, the contribution of surrogate values to the formation of the summation factor ranged from 8.5% to 89.3%, the hazard index ranged from 1.9% to 63.3%, the combined risk of chronic nonspecific toxic effects – from 1.9% to 59.5%, and the individual total carcinogenic risk – from 46.7% to 100%.

Conclusion. The sensitivity of research methods has a significant impact on the quality of assessments of public health risk from exposure to environmental risk factors. When assessing exposure to a complex of potential contaminants in drinking water, it is essential to use a differentiated approach to exposure modeling, taking into account 4 basic criteria for the substitution of insignificant values of concentrations: the sensitivity of the research method and the proportion of samples with quantitative determination, the risk profile of the contaminant (carcinogenic potential, ability to cumulate, remote effects) and its priority for the study area (based on the long-term profile of environmental risks and trends). Algorithm for the substitution of insignificant concentration values, taking into account the existing water use conditions in the country has been proposed and tested. Its application will rationally improve methodological approaches to chronic exposure assessment, avoid significant overestimation of exposure levels without reducing the quality and reliability of health risk assessments. Furthermore, it will allow us to concentrate measures to minimize health risks on the most priority aspects.

Keywords: *drinking water, concentrations, exposure modelling, surrogate values, insignificant values, health risk assessment*

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Funding. The work represents generalization and systematization of the results of performed health risk assessments from exposure of chemicals originated from water, including within tasks 01.01. “To develop method for the hygienic assessment of volatile chemicals in drinking water” and 01.03. “To establish scientifically and implement a method for the integral assessment of health risks associated with water use” of the State Scientific and Technical Program “Scientific and Technical Support of Quality and Availability of Medical Services”, 2021-2025 (Reg. No. of R&D 20190177, 20190341), “To establish scientifically and develop a method for assessing the formation of additional cases of morbidity and mortality of the population from pollution of ambient air, indoor air, and drinking water” of the Plan of research and developments of national subject-matter purpose aimed at scientific and technical support of the Ministry of Health of the Republic of Belarus for 2022 (Reg. No. of R&D 20220606).

For citation: Drazdova AV. Modeling of waterborne chemicals exposure with substitution of insignificant values of concentrations. *Health and Ecology Issues*. 2024;21(4):120–134. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2024-21-4-13>

Введение

Обеспечение населения безопасной и качественной питьевой водой, идентификация и минимизация рисков в системах питьевого водоснабжения являются важными инструментами профилактики неинфекционных и инфекционных заболеваний, здоровьесбережения на популяционном уровне [1–3]. В Республике Беларусь оценка риска здоровью населения при поступлении химических веществ с водой выполняется учреждениями государственного санитарного надзора с 2005 г., ее результаты являются до-

казательной базой для обоснования приоритетных профилактических мер на отдельных административных территориях. В 2021 г. методика была усовершенствована на основе результатов научных исследований и практики применения — отработаны методические подходы к проведению оценки рисков здоровью при многосредовом поступлении химических веществ из питьевой воды¹ [4], при чрезвычайных ситуациях на централизованных системах питьевого водоснабжения с поступлением химических веществ, влияющих на органолептические свой-

¹ Метод оценки риска для здоровья населения, обусловленного воздействием химических веществ, загрязняющих питьевую воду: инструкция по применению : утв. Гл. гос. санитар. врачом Респ. Беларусь 28.01.2022, рег. № 019-1221 / Е. В. Дроздова [и др.]. – Минск, [б. и.], 2022. – 51 с.

ства питьевой воды². Обоснованы методические подходы к нормированию химических веществ в воде³ [5] и интегральной оценке питьевой воды по критериям риска здоровью с учетом особенностей условий водопользования в республике⁴ [6], предложены подходы к моделированию агрегированной экспозиции веществ биологического происхождения при различных видах водопользования [7]. Таким образом, методическая база позволяет выполнять оценки риска здоровью населению от воздействия химического фактора при различных видах водопользования.

Ключевым преимуществом методологии оценки риска здоровью населения является «гибкость», ее применение в дополнение к гигиенической оценке позволяет повысить надежность оценок санитарно-эпидемиологического благополучия на территории с учетом особенностей водопользования населения, организации водоснабжения, приоритетных факторов риска на изучаемой территории, их комбинированного и сочетанного воздействия [1–4, 8, 9]. Это достигается за счет проведения оценки риска по различным сценариям воздействия (сценарий жилой зоны или производственный сценарий, центральная тенденция или максимальная экспозиция и др.) для различных групп населения (половозрастных или наиболее уязвимых), а также возможности применения факторов экспозиции, установленных в собственных исследованиях для конкретной территории. Повысить объективность оценок возможно за счет применения наиболее актуальных параметров «доза-эффект» для воздействующего фактора (в том числе установленных на основе биомаркеров экспозиции и чувствительности, экспериментальных моделей патологии животных) [10–12], а также современных данных о токсичности и опасности вещества из авторитетных источников данных без их формализации в национальных нормативных документах, что особенно важно для оценки отдаленных эффектов, например канцерогенных рисков [13].

В то же время, несмотря на универсальность методологии, каждый этап оценки рисков здоровью имеет свои неопределенности. На практике одним часто возникающим вопросом на этапе оценки экспозиции является обоснованность подхода к учету незначимых значений концентраций (здесь и далее по тексту термин «незначимые значения» используется для обозначения результатов лабораторных исследований, когда вещество регистрируется на уровне ниже нижне-

го предела количественного определения метода измерений (НПКО)) [14]. Так, при часто используемом унифицированном подходе к замене незначимых значений концентраций на значения, соответствующие НПКО, $\frac{1}{2}$ НПКО или $\text{НПКО}/\sqrt{2}$, возникают ситуации заведомой переоценки опасности (рисков) здоровью населения, особенно при недостаточной чувствительности методов исследований по отдельным параметрам в сочетании с большим перечнем контролируемых показателей (в воде определяются регулярно порядка 35 веществ, для многих в реальной ситуации характерна высокая удельная доля незначимых значений). Типичный пример на практике: при низкой чувствительности метода определения мышьяка (на уровне референтных концентраций (RfC)) замена незначимых значений на $\frac{1}{2}$ НПКО, $\text{НПКО}/\sqrt{2}$ или НПКО приводит к тому, что по результатам оценки рисков канцерогенный риск от мышьяка заведомо характеризуется как «средний» или «высокий» и определяет до 90–100 % вклада в формирование индивидуального канцерогенного риска, при этом данный элемент не относится к приоритетным для республики и фактически может не присутствовать в воде. В этой связи у автора настоящей статьи вызывают вопросы формулировки, встречающиеся в научных публикациях (особенно базирующихся на данных социально-гигиенического мониторинга), типа «...наибольший вклад в формирование риска хронического и/или канцерогенного действия, риска для ... систем организма вносит(ят) ...», относящиеся к веществам, присутствие которых в питьевой воде и воде источника в «обычных» условиях в опасных для здоровья концентрациях маловероятно (например, мышьяк, никель, кадмий, свинец, цианиды и т. д.). Целенаправленный анализ русско- и англоязычных литературных источников и методических документов не позволил выявить какие-либо рекомендации по «преодолению» указанных проблемных аспектов.

Обозначенные выше аспекты свидетельствуют, что разработка научно-обоснованных методических подходов к оптимальной замене незначимых значений концентраций веществ в воде на этапе оценки экспозиции с учетом чувствительности используемых методов количественного определения, доли значимых значений, опасности веществ при пероральном поступлении и других релевантных факторов, представляется актуальной и будет иметь важное прикладное значение.

2. Метод оценки риска здоровью населения, обусловленного воздействием химических веществ, определяющих органолептические свойства питьевой воды при возникновении аварийных (чрезвычайных ситуаций) на централизованных системах питьевого водоснабжения : инструкция по применению : утв. Гл. гос. санитар. врачом Респ. Беларусь 14.12.2021, рег. № № 015-1121 / С. И. Сычик [и др.]. – Минск, [б. и.], 2021. – 28 с.

3. Метод гигиенического нормирования химических веществ в питьевой воде по критериям риска здоровью: инструкция по применению : утв. Гл. гос. санитар. врачом Респ. Беларусь 11.05.2022, рег. № 021-1221 / Е. В. Дроздова [и др.]. – Минск, [б. и.], 2022. – 13 с.

4. Метод интегральной оценки рисков здоровью, ассоциированных с водопользованием : инструкция по применению : утв. Гл. гос. санитар. врачом Респ. Беларусь 10.06.2022, рег. № 031-1221 / Е. В. Дроздова [и др.]. – Минск, [б. и.], 2022. – 23 с.

Цель исследования

Научно обосновать методические подходы к моделированию хронической экспозиции при поступлении химических веществ с питьевой водой с учетом замещения незначимых значений концентраций, полученных при лабораторных исследованиях.

Материалы и методы

Исследования были проведены на базе Научно-исследовательского института гигиены, токсикологии, эпидемиологии, вирусологии и микробиологии государственного учреждения «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья» (до 01.07.2024 — республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр гигиены»). Объектом исследования являлись результаты лабораторных исследований проб питьевой воды, отобранных перед поступлением в распределительную сеть крупных населенных пунктов республики за трехлетний период. Для охвата наиболее типичных ситуаций для республики [4, 5, 14, 15] выбраны 3 примера (пилотных водопровода):

- Пример 1 (ВЗ 1): водопровод с подземным водозабором, для которого характерен многолетний тренд на постепенное повышение содержания в воде источника одного из приоритетных загрязнителей — нитратов.

- Пример 2 (ВЗ 2): водопровод с подземным водозабором, характеризующийся повышенными концентрациями железа и марганца в воде.

- Пример 3 (ВЗ 3): водопровод с водозабором из поверхностного источника с применением реагентных методов обеззараживания воды (хлорирование).

Проведен анализ чувствительности использованных методов лабораторных исследований относительно значений RfC и предельно-допустимых концентраций (ПДК). Далее для целей работы были обоснованы 6 моделей замены незначимых значений лабораторных исследований, с их применением для всех изученных веществ в воде рассчитаны значения среднесуточных (I), максимальных (Max) и $P95$ -концентраций и выполнена оценка экспозиции. Проведены расчеты показателей риска здоровью населения от употребления питьевой воды: 1) за весь период жизни (хроническая экспозиция) — на основании среднесуточных концентраций веществ в воде, 2) за период 7 лет (срок планирования и реализации профилактических программ по водоснабжению и водоотведению) — на основании значений, соответствующих $P95$. Расчеты проводились согласно методу, изложенному в инструкции по применению¹. Для целей исследования учи-

тывалось только пероральное поступление веществ из воды в питьевых целях в организм взрослого среднестатистического человека при стандартной экспозиции (частота воздействия — 350 дней в году, длительность хронического воздействия — 30/70 лет для неканцерогенов и канцерогенов соответственно). Для повышения надежности оценок использовали актуализированные данные о токсичности и опасности химических веществ, их канцерогенном потенциале (источники информации: интегрированная система информирования о рисках Агентства по охране окружающей среды США (IRIS), Агентство по охране здоровья Канады (Health Canada), руководства Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), Международного агентства по изучению рака (МАИР) [16]). В частности, учтены современные данные по хрому (6+), марганцу, бару, барию, мышьяку, трихлорэтилену, тетрахлорэтилену, 2,4-Д, ДДТ, линдану.

Полученные результаты обобщены по всем 6 моделям расчета концентраций с учетом замены незначимых значений лабораторных исследований для каждого пилотного объекта и по 3 объектам в целом. Проанализирован удельный вклад замещенных незначимых значений в формирование итоговых значений параметров, характеризующих гигиеническую безопасность (коэффициент суммации), неканцерогенный и канцерогенный риск здоровью (индекс опасности, потенциальный риск хронического действия, индивидуальный канцерогенный риск) при разных способах моделирования, степень их влияния на оценку полученных результатов согласно общепринятым критериям¹.

Результаты исследования статистически обработаны общепринятыми методами параметрической и непараметрической статистики с использованием лицензионного программного обеспечения Microsoft Office Excel 11 (Microsoft, США) и Statistica, 10 (StatSoft, США). Различия между сравниваемыми показателями расценивали как достоверные при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Проведена гигиеническая оценка результатов рутинных (плановых) лабораторных исследований питьевой воды на выходе со станций водоочистки и водоподготовки за 3 последовательных года по органолептическим, обобщенным и санитарно-химическим показателям (изучалось содержание в воде компонентов природного происхождения и соединений потенциального антропогенного загрязнения (средства защиты растений, побочные продукты водоподготовки)). Количество и перечень контролируемых показателей определялись видом источни-

ка, характеристиками водоносных горизонтов и водосборной территории, применяемыми методами водоподготовки. В водопроводной воде с подземным водозабором (ВЗ 1 и ВЗ 2) определялись от 11 до 39 показателей, в том числе 4 органолептических, 7 обобщенных, 3 вещества 4-го класса опасности (аммиак, хлориды, сульфаты), 6 — 3-го класса (железо, нитраты, медь, хром (6+), молибден, марганец), 14 — 2-го класса (цианиды, фториды, бор, барий, стронций, цинк, свинец, алюминий, кадмий, никель, селен, нитриты, ДДТ, 2,4-Д), 4 — 1-го класса (ртуть, бериллий,

мышьяк, линдан). В воде с поверхностным водозабором (ВЗ 3) — от 20 до 24 показателей (в зависимости от времени и сезона отбора пробы), приоритетных для данного вида водоисточников и используемых способов водоподготовки (хлорирование). Детальная информация о перечнях контролируемых показателей и удельном весе проб с определением показателей, в том числе с превышением гигиенических нормативов, приведена в таблице 1, а в таблице 2 показатели по пилотным объектам сгруппированы в зависимости от доли проб с определением.

Таблица 1. Результаты исследования питьевой воды на пилотных объектах
Table 1. Results of drinking water testing at pilot sites

Показатель	Единицы измерения	ПДК	Показатель вредности	Класс опасности	Удельный вес проб со значимыми значениями (нестандартных проб), %		
					ВЗ 1	ВЗ 2	ВЗ 3
Запах	баллы	2	орг.	—	100 (1,7)	100	—
Привкус	баллы	2	орг.	—	100 (2,4)	100 (9,3)	—
Цветность	градусы	20	орг.	—	94,6	98,4	—
Мутность	мг/дм ³	5	орг.	—	37,2 (1,2)	84,7 (14,1)	—
pH	единицы	7-9	—	—	100	100	—
Сухой остаток	мг/дм ³	1000	—	—	100	100	—
Жесткость	ммоль/дм ³	7	—	—	100 (8,0)	100 (2,2)	—
Окисляемость	мг/дм ³	5,0	—	—	100 (0,2)	100	—
Нефтепродукты	мг/дм ³	0,1	—	—	17,8	14,2	—
АПАВ	мг/дм ³	0,05	—	—	0	0,0	—
Фенольный индекс	мг/дм ³	0,25	—	—	2,9	2,7	—
Хлориды (Cl ⁻)	мг/дм ³	350	орг.	4	100	100	—
Сульфаты (SO ₄ ²⁻)	мг/дм ³	500	орг.	4	100	100	—
Железо (Fe) (сумм.)	мг/дм ³	0,3	орг.	3	41,6 (23,8)	84,2 (50,0)	—
Марганец (Mn)	мг/дм ³	0,10	орг.	3	68,0 (24,7)	97,1 (14,7)	—
Фториды (F ⁻)	мг/дм ³	1,50	с-т.	2	48,4	100 (4,4)	100
Бор В (сумм.)	мг/дм ³	1,00	с-т.	2	5,0 (3,0)	21,1 (7,9)	0
Барий (Ba)	мг/дм ³	0,70	с-т.	2	32,2 (0,9)	84,2	3,0
Нитраты (NO ₃ ⁻)	мг/дм ³	45	орг.	3	76,1 (15,2)	11,8	—
Нитриты (NO ₂ ⁻)	мг/дм ³	3,0	орг.	2	0	0	19,0
Аммиак (NH ₄ ⁺)	мг/дм ³	1,5	орг. зап.	4	2,1	5,3	—
Селен (Se)	мг/дм ³	0,01	с-т.	2	0	0	0
Алюминий (Al)	мг/дм ³	0,50	с-т.	2	54,6	88,2	96,3
Цианиды (CN ⁻)	мг/дм ³	0,035	с-т.	2	4,0	0	0
Стронций (Sr)	мг/дм ³	7,0	с-т.	2	1,7	5,3	0
Цинк (Zn)	мг/дм ³	5,0	с-т.	2	66,0	67,6	—

Окончание таблицы 1
End of Table 1

Показатель	Единицы измерения	ПДК	Показатель вредности	Класс опасности	Удельный вес проб со значимыми значениями (нестандартных проб), %		
					ВЗ 1	ВЗ 2	ВЗ 3
Медь (Cu)	мг/дм ³	1,00	с-т.	3	57,7	61,8	—
Кадмий (Cd)	мг/дм ³	0,001	с-т.	2	32,7 (0,9)	42,1	39,4
Никель (Ni)	мг/дм ³	0,02	с-т.	2	5,9	26,3	—
Молибден (Mo)	мг/дм ³	0,07	с-т.	3	22,8	44,7	21,2
Ртуть (Hg)	мг/дм ³	0,0005	с-т.	1	0	0	0
Свинец (Pb)	мг/дм ³	0,01	с-т.	2	10,9	15,8	15,2
Бериллий (Be)	мг/дм ³	0,0002	с-т.	1	0	0	0
Хром 6+ (Cr (6+))	мг/дм ³	0,05	с-т.	3	0	0	—
Мышьяк (As)	мг/дм ³	0,01	с-т.	1	0	0	0
Линдан	мг/дм ³	0,002	с-т.	1	0	0	0
ДДТ	мг/дм ³	0,002	с-т.	2	0	0	0
2,4-Д	мг/дм ³	0,03	с-т.	2	0	0	0
Хлороформ (ХФ)	мг/дм ³	0,2	с.-т., к.	2	—	—	100
Бромдихлорметан (БДХМ)	мг/дм ³	0,03	с-т., к.	1	—	—	100
1,2-дихлорэтан (1,2-ДХЭ)	мг/дм ³	0,02	с-т.	2	—	—	0
Трихлорэтилен (ТрХЭ)	мг/дм ³	0,06	с-т.	2	—	—	0
Тетрахлорэтилен (ТеХЭ)	мг/дм ³	0,02	с-т.	2	—	—	0
Дибромхлорметан (ДБХМ)	мг/дм ³	0,03	с-т.	2	—	—	0
Бромформ (БФ)	мг/дм ³	0,1	с.-т.	2	—	—	0

«—» исследования по данному показателю не проводились.

Примечания:

1. Полужирным курсивом выделены вещества с установленным канцерогенным потенциалом.
2. В столбцах 6–8 в скобках приведены значения доли проб воды с превышением ПДК.

Таблица 2. Распределение исследуемых показателей в зависимости от доли проб со значимыми значениями

Table 2. Distribution of investigated indicators depending on the share of samples with significant values

Объект	Доля исследованных проб с определением показателя (выявлением, детекцией вещества)					
	0	> 0–5 %	> 5–25 %	> 25–50 %	> 50 – < 100 %	100 %
ВЗ 1	АПАВ, Se, NO ₂ ⁻ , Hg, Cr (6+), Be, As, линдан, ДДТ, 2,4-Д	Фенольный индекс Цианиды Sr NH ₄ ⁺	Нефте-продукты B, Pb Ni, Mo	Мутность Fe F- Ba Cd	Цветность NO ₃ ⁻ Mn Al Zn, Cu	Запах, привкус pH, окисляемость сухой остаток, жесткость SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻
ВЗ 2	АПАВ, цианиды Se, NO ₂ ⁻ Hg, Cr (6+), Be, As линдан, ДДТ, 2,4-Д	Фенольный индекс	Нефте-продукты B, Sr, Pb NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	Ni Mo Cd	Цветность Мутность, Fe, Mn, Ba Al, Zn, Cu	Запах, привкус, pH, окисляемость сухой остаток, жесткость SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , F ⁻

Окончание таблицы 2.
End of Table 2

Объект	Доля исследованных проб с определением показателя (выявлением, детекцией вещества)					
	0	> 0–5 %	> 5–25 %	> 25–50 %	> 50 – < 100 %	100 %
ВЗ 3	В, Sr, Se, Hg, Be, As, цианиды, ДДТ, 2,4-Д, линдан, БФ, ТрХЭ, ТеХЭ, ДБХМ	Ba	Pb, NO ₂ ⁻ , Mo	Cd	Al	F ⁻ , ХФ, БДХМ

Примечание. Курсивом выделены показатели, не включенные в оценку рисков.

Анализ показал, что на ВЗ 1 за 3 года исследовались 411 проб воды по 11–39 показателям, из них превышения ПДК выявлены по содержанию 6 веществ: Fe (23,8 %, до 6,3 ПДК), Mn (24,7 %, до 2,1 ПДК), В (3,0 %, 1,5 ПДК), Ba (0,9 %, до 1,2 ПДК), нитраты (15,2 %, до 2,5 ПДК), Cd (0,9 %, до 3 ПДК). Из веществ, обладающих канцерогенным потенциалом, определялся только свинец в 10,9 % проб в концентрациях до 0,3 ПДК. Удельный вес проб, в которых с применением использованных методов было выявлено содержание в воде веществ, включенных в последующем в оценку риска здоровью: нитраты — 76,1 %, Mn — 68,0 %, Zn — 66,0 %, Cu — 57,7 %, Al — 54,6 %, фториды — 48,4 %, Fe — 41,6 %, Cd — 32,7 %, Ba — 32,2 %, Mo — 22,8 %, Pb — 10,9 %, Ni — 5,9 %, В — 5 %, цианиды — 4,0 %, Sr — 1,7 %, аммиак — 2,1 %.

На ВЗ 2 за 3 года исследовались 183 пробы водопроводной воды. Отмечены превышения ПДК по содержанию 4 веществ: Fe (50,0 %, до 5,9 ПДК), Mn (14,7 %, до 2,8 ПДК), В (7,9 %, до 2,2 ПДК), фтор (4,4 %, до 1,9 ПДК). Из веществ с канцерогенным потенциалом определялся только свинец в 15,8 % проб в концентрациях до 0,4 ПДК. Удельный вес проб воды, в которых с применением использованных методов было выявлено содержание веществ, включенных в последующем в оценку риска здоровью: фториды — 100,0 %, **Mn — 97,1 %**, Al — 88,2 %, **Fe и Ba — по 84,2 %**, Zn — 67,6 %, Cu — 61,8 %, Mo — 44,7 %, Cd — 42,1 %, Ni — 26,3 %, В — 21,1 %, Pb — 15,8 %, нитраты — 11,8 %, Sr и аммиак — по 5,3 %.

Из исследованных 39 показателей в подземных водах ВЗ 1 и ВЗ 2 ни в одной пробе не выявлены АПАВ, нитриты, Se, Be, Cr (6+), As, Hg, пестициды, а на ВЗ 2 также цианиды — все вещества включались в оценку риска с учетом замещения незначительных значений.

За 3 года исследовались 66 проб водопроводной воды на поверхностном ВЗ 3 по 24 показателям, при этом фториды, хлороформ и бромдихлорметан определялись в 100 % исследованных на данные показатели проб, Al —

в 96,3 %, Cd — 39,4 %, Mo — 21,2 %, нитриты — 16,0 %, Pb — 15,2 %, Ba — 3,0 %, другие вещества не выявлены. В 12,6 % проб установлено превышение ПДК по содержанию алюминия (до 1,6 раза). Из канцерогенов определялись свинец в 15,2 % проб в концентрации до 0,4 ПДК, в 100 % проб — хлороформ до 0,9 ПДК и бромдихлорметан — до 0,6 ПДК. В оценку риска включены 5 веществ 1-го класса опасности (Hg, Be, As, линдан, бромдихлорметан), 18 веществ 2-го класса опасности (цианиды, фториды, В, Ba, Sr, Pb, Al, Cd, Se, нитриты, ДДТ, 2,4-Д, хлороформ, дибромхлорметан, бромформ, 1,2-дихлорэтан, трихлорэтилен, тетрахлорэтилен) и 1 вещество 3-го класса опасности (Mo).

Проведенный анализ чувствительности используемых методов исследований относительно значений ПДК и RfC показал, что они обладали достаточной чувствительностью для гигиенической оценки и последующей оценки рисков здоровью, для некоторых показателей использовались различные методы определения с разными НПКО. Исключение составил мышьяк (1,0 ПДК — недостаточная чувствительность для оценки рисков). Для более детального анализа в таблице 3 показатели сгруппированы в зависимости от класса опасности вещества (от 1 до 4) и значения нижнего предела количественного определения метода, выраженного в долях ПДК, разделенных на 4 диапазона: «0,001–0,01 ПДК», «> 0,01–0,1 ПДК», «> 0,1–0,5 ПДК», «> 0,5 ПДК». Показано, что большинства веществ 2-го и 3-го классов опасности НПКО методов находится в диапазонах до 0,1 ПДК, в то время как для веществ 1-го класса опасности методы относятся к диапазону «> 0,1–0,5 ПДК», что может быть объяснимо низкими количественными значениями ПДК (микрограммы, десятые и сотые микрограмма) и возможностями приборной базы. Из канцерогенов НПКО методов находилось в диапазонах:

— «0,001–0,01 ПДК» для бромдихлорметана (1-й класс, выявлен в 100 % проб $\geq 0,0003$ мг/дм³), хлороформа (2-й класс, выявлен в 100 %

проб $\geq 0,0015$ мг/дм³), бромформ (2-й класс, не выявлен в 100 % проб на уровне $\geq 0,001$ мг/дм³);
 — «> 0,01–0,1 ПДК» для веществ 2-го класса — трихлорэтилена (0,0015 мг/дм³), тетрахлорэтилена (0,0006 мг/дм³), дибромхлорметана (0,001 мг/дм³), свинца (0,001 мг/дм³) и 2,4-Д (0,003 мг/дм³) — не выявлены в 100 % проб;
 — «> 0,01–0,5 ПДК» для 1,2-дихлорэтана (2-й класс, 0,001 и 0,005 мг/дм³) и Cr (6+) (3-й

класс опасности, 0,001 и 0,025 мг/дм³) — не выявлены в 100 % проб;
 — «> 0,1–0,5 ПДК» для бериллия (1-й класс, 0,00005 и 0,0001 мг/дм³), линдана (1-й класс, 0,001 мг/дм³), ДДТ (2-й класс, 0,001 мг/дм³) — не выявлены в 100 % проб;
 — « $\geq 0,5$ ПДК» для мышьяка (1-й класс, 0,005 и 0,01 мг/дм³) — не выявлен ни в одной исследованной пробе.

Таблица 3. Характеристика чувствительности использованных методов лабораторных исследований

Table 3. Characterization of sensitivity of the used methods for laboratory testing

Класс опасности вещества	Характеристика нижнего предела количественного определения, доли ПДК (числовое значение НПКО, мг/дм ³)			
	0,001-0,01 ПДК	> 0,01-0,1 ПДК	> 0,1-0,5 ПДК	> 0,5 ПДК
1-й	БДХМ: 0,01 ПДК (0,0003)	Hg: 0,1 ПДК (0,0001)	As: 0,5 ПДК (0,005) Hg: 0,2 ПДК (0,0001), 0,4 ПДК (0,0002) Be: 0,25 ПДК (0,00005) и 0,5 ПДК (0,0001) Линдан: 0,5 ПДК (0,001)	As: 1,0 ПДК (0,01)
2-й	Zn: 0,0002 ПДК (0,001) и 0,01 ПДК (0,05) NO ₂ : 0,001 ПДК (0,003) ХФ: 0,008 ПДК (0,0015) БФ: 0,01 ПДК (0,001) F: 0,007 ПДК (0,01)	ТрХЭ: 0,03 ПДК (0,0015) ТехЭ: 0,03 ПДК (0,0006) ДБХМ: 0,03 ПДК (0,001) 1,2-ДХЭ : 0,05 ПДК (0,001) В: 0,05 ПДК (0,05) Ni: 0,05 ПДК (0,001) F: 0,03 ПДК (0,05) и 0,07 ПДК (0,1) NO ₂ : 0,07 ПДК (0,2) Sr: 0,07 ПДК (0,5) Ba: 0,07 ПДК (0,05) Al: 0,08 ПДК (0,04) Pb : 0,1 ПДК (0,001) 2,4-Д : 0,1 ПДК (0,003) Se: 0,1 ПДК (0,001) Cd: 0,1 ПДК (0,0001)	Цианиды: 0,3 ПДК (0,01) ДДТ: 0,5 ПДК (0,001) 1,2-ДХЭ : 0,25 ПДК (0,005) Se: 0,2 ПДК (0,002) Cd: 0,3 ПДК (0,0003)	—
3-й	Cu: 0,001 ПДК (0,001) NO ₃ : 0,004 ПДК (0,2)	Mo: 0,01 ПДК (0,001) и 0,03 ПДК (0,002) Cr (6+) : 0,02 ПДК (0,001) Mn: 0,1 ПДК (0,01)	Fe: 0,3 ПДК (0,1) Cr (6+) : 0,5 ПДК (0,025)	—
4-й	—	—	NH ₄ ⁺ : 0,3 ПДК (0,39)	—

Примечание. Полужирным шрифтом выделены вещества (соединения), обладающие канцерогенным потенциалом.

С учетом анализа чувствительности методов, частоты выявления веществ в пробах, их опасности для здоровья и приоритетности как загрязнителей для республики далее для целей работы были предложены 6 моделей (вариантов) замены незначимых значений лабораторных исследований в базе данных для оценки экспозиции при поступлении химических веществ из воды:

1. Три модели с единообразным подходом к замене незначимых значений для всех показателей: «на 0», «на 0,5 НПКО» и «на НПКО».

2. Три модели с дифференцированным подходом к замене незначимых значений в зависимости от доли проб с определением и чувствительности метода определения конкретного вещества в воде (достаточная для оценки риска или недостаточная — НПКО на уровне > 0,5 ПДК (RfC)):

• V1 — замена «на 0,1 НПКО» для веществ, определение которых в воде ведется с использованием метода с недостаточной чувствительностью, для остальных веществ — замена

«на 0» при выявлении вещества в менее чем 25 % проб и «на 0,5 НПКО» — при его выявлении в 25 % проб и более;

- V2 — замена «на 0,1 НПКО» для веществ, определение которых в воде ведется с использованием метода с недостаточной чувствительностью, для остальных веществ — замена «на 0» при выявлении вещества в менее чем 5 % проб и «на 0,5 НПКО» — при его выявлении в 5 % проб и более;

- V3 — замена «на 0,1 НПКО» для веществ, определение которых в воде ведется с использованием метода с недостаточной чувствительностью, для остальных веществ — «на 0,5 НПКО».

С применением предложенных моделей для всех изученных веществ в воде рассчитаны значения среднемноголетних (I), максимальных (Max) и P95-концентраций, что позволило рассчитать показатели риска здоровью населения от употребления питьевой воды, в том числе для взрослых, детей до 6 лет и детей 6–18 лет. В оценку риска включены все исследованные химические вещества, за исключением сульфатов и хлоридов, для которых не установлены RfC. Результаты оценки риска для взрослого населения, данные об удельном вкладе мышьяка в формирование уровней канцерогенного риска при различных способах моделирования обобщены в таблице 4.

На рисунке 1 графически представлены данные о вкладе замещающих значений в формирование итоговых значений параметров, характеризующих риск здоровью (коэффициент суммации, индекс опасности, потенциальный риск хронического действия и риск здоровью, индивидуальный канцерогенный риск и неканцерогенный риск) при разных способах моделирования.

Показано, что в целом по 3 объектам для хронической экспозиции (на основании средних значений) замещающие значения вносят в зависимости от вариантов моделирования от 8,5 до 89,3 % в формирование коэффициента суммации, от 1,9 до 63,3 % — индекса опасности, от

1,9 до 59,5 % — комбинированного риска развития хронических неспецифических токсических эффектов и от 46,7 до 100 % — индивидуального суммарного канцерогенного риска. Вклад замещающих значений в формирование показателей риска на период 7 лет (на основании значений P95) ожидаемо ниже — от 0,9 до 70,4 % в коэффициент суммации, от 0 до 31,3 % в индекс опасности, от 0 до 27,6 % в комбинированный риск развития хронических неспецифических токсических эффектов и от 44,0 до 99,9 % в индивидуальный суммарный канцерогенный риск.

Вклад замещающих значений в суммарный канцерогенный риск от 99,8 % и более для подземных водозаборов (ВЗ 1 и ВЗ 2) вне зависимости от вариантов моделирования, при этом из веществ с канцерогенным потенциалом выявлены лишь несколько проб с содержанием свинца в концентрациях \geq НПКО метода. В то время как для ВЗ 3, где в 100 % проб определялись побочные продукты дезинфекции, вклад незначимых значений варьирует от 46,7 % (варианты V1 и V2) до 91,4 % («замена на НПКО»). При средних сценариях (V3 и замена на 0,5 НПКО) вклад мышьяка в формирование показателей канцерогенного риска варьирует от 23,2 % при дифференцированном подходе (V3, мышьяк — «на 0,1 НПКО», остальные — «на 0,5 НПКО») до 60,1 % (замена на 0,5 НПКО) (см. таблицу 4).

Анализ результатов оценки рисков свидетельствует, что значимый «скачок» уровней риска (канцерогенного и неканцерогенного) отмечается при переходе от варианта V2 к варианту V3. На рисунке 2 на примере поверхностного источника наглядно продемонстрировано, как при переходе от варианта V2 к варианту V3 основной вклад в формирование канцерогенного риска вносят именно вещества, не выявленные в пробах воды (детекция 0 %), но с высоким канцерогенным потенциалом и чувствительностью методов определения (НПКО) выше 0,1 ПДК, вероятность выявления которых в текущей ситуации маловероятна (бериллий, линдан, ДДТ и т. д.).

Таблица 4. Результаты гигиенической оценки и оценки риска в зависимости от вариантов моделирования незначительных значений
 Table 4. Results of hygienic and risk assessment depending on modeling variants of insignificant values

Объект	Расчет хронической экспозиции (по I): варианты (модели)						Расчет экспозиции на период 7 лет (по P95): варианты (модели)					
	на 0	V1	V2	V3	0,5ПКО	ПКО	на 0	V1	V2	V3	0,5ПКО	ПКО
Суммарный коэффициент*												
B3 1	0,39	0,52	0,59	1,82	2,02	3,65	1,34	1,39	1,39	2,72	2,92	4,51
B3 2	1,13	1,23	1,33	2,51	2,71	4,29	5,68	5,73	5,73	7,01	7,21	8,74
B3 3	0,80	0,91	0,95	2,21	2,50	4,20	3,79	3,89	3,89	5,23	5,63	7,47
Индекс опасности												
B3 1	2,4	2,7	2,7	4,3	4,5	6,6⁽¹⁾	2,0	2,0	2,0	2,4	2,5	3,0
	Средний											
B3 2	4,7	4,9	5,1⁽¹⁾	6,4	6,6	8,6	3,6	3,6	3,6	3,9	4,0	4,4
	Средний											
B3 3	1,6	1,8	1,8	3,2	3,5	5,3⁽¹⁾	1,2	1,2	1,2	1,6	1,7	2,1
	Средний											
Комбинированный риск развития неспецифических токсических эффектов (Risk_{сум})												
B3 1	0,04	0,05	0,05	0,06⁽¹⁾	0,06	0,07	0,15	0,15	0,15	0,16⁽¹⁾	0,16	0,18
	Племлемый											
B3 2	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,11	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27
	Вызывающий опасение											
B3 3	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,09
	Племлемый											
Вызывающий опасение												

Окончание таблицы 4
End of Table 4

Объект	Расчет хронической экспозиции (по 1): варианты (модели)						Расчет экспозиции на период 7 лет (по P95): варианты (модели)					
	на 0	V1	V2	V3	0,5ПКО	ПКО	на 0	V1	V2	V3	0,5ПКО	ПКО
Суммарный канцерогенный риск												
ВЗ 1	3,9E-08	2,1E-05⁽¹⁾	2,1E-05	8,9E-05	1,7E-04	3,4E-04	2,3E-08	2,1E-06⁽¹⁾	2,1E-06	1,0E-05⁽¹⁾	1,8E-05	3,7E-05
	Приемлемый			Средний			Приемлемый	Допустимый		Средний		
	8,6E-08	2,1E-05⁽¹⁾	2,1E-05	8,8E-05	1,7E-04	3,4E-04	7,0E-08	2,1E-06⁽¹⁾	2,1E-06	1,0E-05⁽¹⁾	1,9E-05	3,7E-05
ВЗ 2	Приемлемый			Средний			Приемлемый	Допустимый		Средний		
	3,4E-05	6,3E-05	6,3E-05	9,5E-05	2,1E-04	3,9E-04	5,2E-06	9,4E-06	9,4E-06	1,3E-05⁽¹⁾	2,9E-05	5,3E-05
				Средний			Допустимый			Средний		
ВЗ 3												
Суммарный канцерогенный риск (без учета мышьяка)												
ВЗ 1	3,9E-08	3,9E-08	1,4E-07	6,8E-05⁽¹⁾	6,8E-05	1,4E-04	2,3E-08	2,3E-08	2,3E-08	8,1E-06⁽¹⁾	8,1E-06	1,6E-05⁽¹⁾
	Приемлемый	Приемлемый		Средний			Приемлемый	Приемлемый		Допустимый		Средний
	8,6E-08	8,6E-08	1,8E-07	6,8E-05⁽¹⁾	6,8E-05	1,4E-04	7,0E-08	7,0E-08	7,0E-08	8,2E-06⁽¹⁾	8,2E-06	1,6E-05⁽¹⁾
ВЗ 2	Приемлемый	Приемлемый		Средний			Приемлемый	Приемлемый		Допустимый		Средний
	3,4E-05	3,4E-05	3,4E-05	6,5E-05	6,5E-05	9,7E-05	5,2E-06	5,2E-06	5,2E-06	8,7E-06	8,7E-06	1,2E-05⁽¹⁾
				Средний			Допустимый			Средний		
ВЗ 3												
Вклад мышьяка в формирование показателей суммарного канцерогенного риска												
ВЗ 1	0 %	99,8 %	99,3 %	23,2 %	60,1 %	89,2 %	0 %	98,9 %	98,9 %	20,2 %	55,8 %	55,8 %
ВЗ 2	0 %	99,6 %	99,1 %	23,3 %	60,3 %	60,4 %	0 %	96,7 %	96,7 %	20,1 %	55,7 %	55,8 %
ВЗ 3	0 %	46,7 %	46,6 %	31,0 %	69,2 %	75,1 %	0 %	44,0 %	44,0 %	32,0 %	70,2 %	77,1 %

* Расчет по формуле Аверьянова для веществ 1-го и 2-го классов опасности.
Примечание. Знак (1) и полужирный шрифт означают повышение уровня риска (переход в другую категорию) по сравнению с предшествующим вариантом моделирования (слева направо по столбцам).

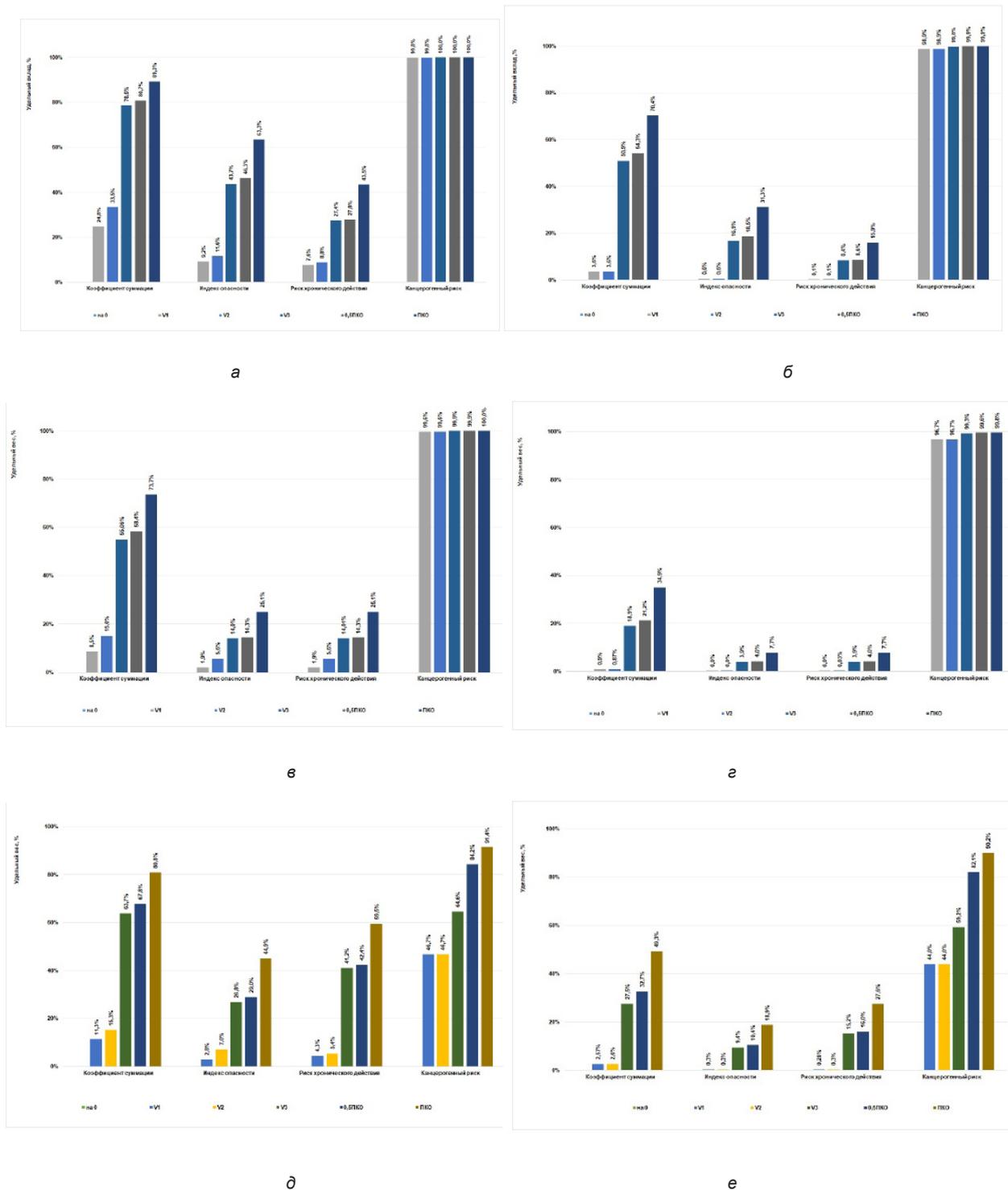


Рисунок 1. Вклад замещающих значений в формирование итоговых значений параметров, характеризующих гигиеническую безопасность и риск здоровью населения, при разных способах моделирования: а — подземный водозабор ВЗ 1 (по средним значениям); б — подземный водозабор ВЗ 1 (по P95); в — подземный водозабор ВЗ 2 (по средним значениям); г — подземный водозабор ВЗ 2 (по P95); д — поверхностный водозабор ВЗ 3 (по средним значениям); е — поверхностный водозабор ВЗ 3 (по P95)
 Figure 1. Contribution of surrogate values to formation of final values of parameters characterizing hygienic safety and public health risk at different modeling methods: а — groundwater intake BZ 1 (based on average values); б — groundwater intake BZ 1 (based on P95); в — groundwater intake BZ 2 (based on average values); г — groundwater intake BZ 2 (based on P95); д — surface water intake BZ 3 (based on average values); е — surface water intake BZ 3 (based on P95)

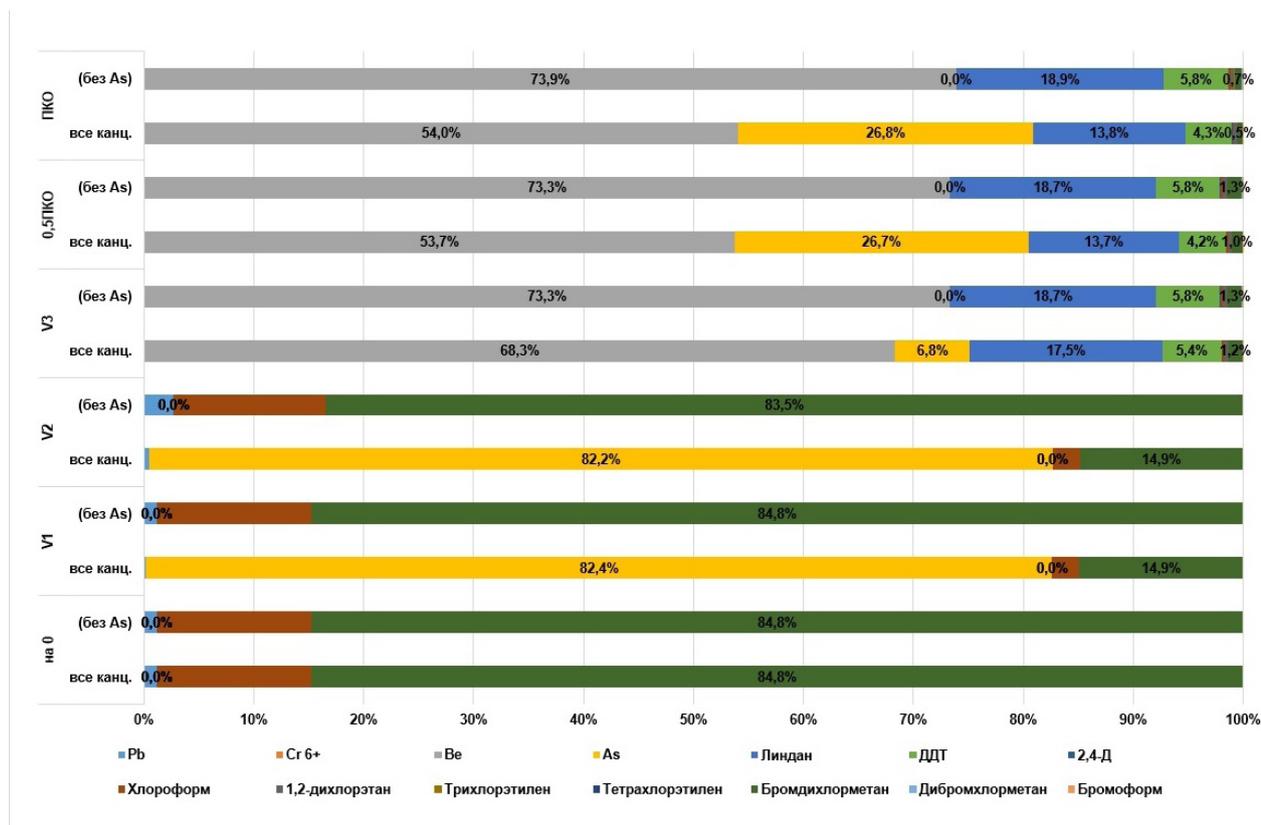


Рисунок 2. Вклад исследованных веществ в формирование значений суммарного канцерогенного риска в зависимости от моделирования замещающих значений (по средним концентрациям) для поверхностного источника (VZ 3)
Figure 2. Contribution of the studied substances to the formation of total carcinogenic risk values depending on the modeling of surrogate values for a surface source (VZ 3)

Заключение

Результаты исследования позволили продемонстрировать, что чувствительность методов исследования может оказывать существенное влияние на качество проводимых оценок рисков здоровью населения, ассоциированных с поступлением химических веществ с водой, и следовательно – трактовку ситуации в конкретном населенном пункте с точки зрения санитарно-эпидемиологического благополучия. Применение методов определения химических соединений в воде с более высокой чувствительностью, предпочтительно с НПКО $\leq 0,1$ RfC, позволяет существенно снизить неопределенности оценки экспозиции и рисков здоровью при хроническом воздействии, что наиболее актуально для веществ 1–2-го классов опасности, особенно обладающих канцерогенным потенциалом.

При проведении оценки экспозиции от воздействия комплекса потенциальных загрязнителей питьевой воды целесообразно использовать дифференцированный подход моделирования экспозиции, учитывающий 4 базовых критерия при замещении незначимых значений концен-

траций: 1) чувствительность используемого метода исследований показателя, 2) доля проб с количественным определением показателя из всего массива исследований, 3) профиль рисков загрязнителя — канцерогенный потенциал, способность к кумуляции, отдаленные эффекты, 4) приоритетность показателя для республики и изучаемой территории, установленная на основе многолетнего профиля внешнесредовых рисков и тенденций (используемые водоисточники, технологии водоподготовки, профиль хозяйственной деятельности, данные многолетнего мониторинга качества воды — не менее 20 лет).

Наиболее рациональным представляется следующий алгоритм замещения незначимых значений концентраций с учетом сложившихся в республике условий водопользования и лабораторно-методической базы:

— при достаточной чувствительности метода определения вещества для оценки рисков — незначимые значения концентраций замещают на $0,5$ НПКО или $\text{НПКО}/\sqrt{2}$;

— при достаточной чувствительности метода определения для оценки рисков и выявления

вещества в < 5 % отобранных проб — незначимые значения замещают на 0;

— при высокой чувствительности метода (НПКО $\leq 0,1$ RfC (ПДК)), обнаружении вещества в < 5 % проб, отсутствии превышений ПДК — среднесуточная концентрация может быть принята нулевой и не учитываться для оценки риска;

— при недостаточной чувствительности метода определения вещества в воде для оценки рисков (НПКО > 0,5 ПДК) и отсутствии проб с определениями, но при этом вещество потенциально может присутствовать в воде в сложившихся условиях водопользования — для замены незначимых значений лабораторных исследований в базе данных для оценки экспозиции возможно использовать значение 0,1 НПКО на переходный период до разработки и внедрения нового метода;

— вне зависимости от чувствительности используемого метода и доли проб с определением нецелесообразно исключать из оценки риска вещества, обладающие канцерогенным потенциалом, способностью к кумуляции, отдаленными эффектами воздействия, и потенциально присутствующие в воде (например, побочные продукты дезинфекции воды, вещества, потенциально ми-

грирующие из материалов и реагентов, контактирующих с водой).

В зависимости от целей исследования, особенностей водопользования на территории, объема исходных данных (например, за 10 лет и более) и кратности исследований, перечня исследованных показателей и используемых методов лабораторных исследований могут быть предложены иные численные значения для критериев принятия решений при замещении незначимых значений (критерий 1 — «доля определений», например < 10 %, < 25 %; критерий 2 — «чувствительность метода относительно значений RfC», например НПКО $\leq 0,01$ RfC (ПДК) и др.).

Применение предложенного и апробированного алгоритма замещения незначимых значений концентраций веществ рационально и позволит усовершенствовать методические подходы к оценке хронической экспозиции, при этом избежать значительной переоценки уровней экспозиции без снижения качества и надежности проводимых оценок риска здоровью населения, позволяя сконцентрировать меры по минимизации рисков здоровью на наиболее приоритетных аспектах.

Список литературы / References

- Guidelines for drinking-water quality, fourth edition, incorporating the 1st and 2nd addendum. [Electronic resource]. [date of access 2024 June 06]. Available from: Mode of access: <https://www.who.int/publications/item/9789240045064>
- Зайцева Н.В., Клейн С.В. К вопросу оценки потенциального риска причинения вреда здоровью при осуществлении хозяйственной деятельности в сфере «Сбор и очистка воды» и степени его реализации. *Анализ риска здоровью*. 2018;(3):40-53. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.3.05>
Zaitseva NV, Kleyn SV. On assessing potential risk of damage to health when dealing with water collection and purification and probability of its occurrence. *Health Risk Analysis (Russian journal)*. 2018;(3):40-53. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.3.05>
- Клейн С.В., Вековшинина С.А. Приоритетные факторы риска питьевой воды систем централизованного питьевого водоснабжения, формирующие негативные тенденции в состоянии здоровья населения. *Анализ риска здоровью*. 2020;(3):49-60. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.06>
Kleyn SV, Vekovshinina SA. Priority risk factors related to drinking water from centralized water supply system that create negative trends in population health. *Health Risk Analysis, Russian journal* 2020;(3):49-60. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.06>
- Дроздова Е.В. Риск здоровью населения, ассоциированный с воздействием побочных продуктов дезинфекции в питьевой воде с учетом множественности путей их поступления. В: БГМУ в авангарде медицинской науки и практики: рецензир. ежегод. сб. науч. тр. В 2 т. Минск: БГМУ; 2023;13(Т.2):159-168. [дата обращения 2024 March 20]. Режим доступа: <https://rep.bsmu.by/bitstream/handle/BSMU/39337/23.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Drozдова EV. Health risk associated with exposure to disinfection by-products in drinking water, taking into account multiple pathways. In: BSMU v avangarde medicinskoj nauki i praktiki: peer-reviewed annual collection of scientific articles. Minsk: BGMU; 2023;13(V.2):159-168. Available from: <https://rep.bsmu.by/bitstream/handle/BSMU/39337/23.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (In Russ.)
- Дроздова Е.В. Научное обоснование актуализации гигиенических нормативов безопасности питьевой воды. В: Здоровье и окружающая среда: рецензир. ежегод. сб. науч. тр. Минск: Науч.-практ. центр гигиены; 2022;32:219-240. [дата обращения 2024 Август 20]. Режим доступа: https://rspch.by/Docs/v32_sbornik.pdf
- Drozдова EV. Scientific substantiation of actualization of hygienic standards of drinking water safety. In: Health and Environment: peer-reviewed annual collection of scientific articles. Minsk: Scientific and Practical Center of Hygiene; 2022;32:219-240. [date of access 2024 August 20]. Available from: https://rspch.by/Docs/v32_sbornik.pdf (In Russ.)
- Дроздова Е.В. Интегральная оценка питьевой воды по химическому составу в системе профилактических мер: методология, критерии оценки, применение. В: Здоровье и окружающая среда: рецензир. ежегод. сб. науч. тр. Минск: Науч.-практ. центр гигиены; 2023;33:10-23. [дата обращения 2024 Август 20]. Режим доступа: https://rspch.by/Docs/v33_sbornik.pdf
- Drozдова EV. Integral assessment of drinking water by chemical composition in the system of preventive measures: methodology, assessment criteria, application. Minsk: Scientific and Practical Center of Hygiene; 2023;33:10-23. [date of access 2024 August 20]. Available from: https://rspch.by/Docs/v33_sbornik.pdf (In Russ.)
- Дроздова Е.В. Моделирование агрегированной экспозиции химических веществ биологического происхождения при различных видах водопользования на примере приоритетных цианотоксинов. *Проблемы здоровья и экологии*. 2024;21(2):103-116. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2024-21-2-13>
- Drozдова AV. Modeling of aggregated exposure to chemical substances of biological origin for various types of water use in case of priority cyanotoxins. *Health and Ecology Issues*.

2024;21(2):103-116. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2024-21-2-13>

8. Strengthening Drinking-Water Surveillance Using Risk-Based Approaches. [Electronic resource]. [date of access 2024 August 21]. Available from: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/329396/9789289054430-eng.pdf?sequence=1>

9. Фридман К.Б., Новикова Ю.А., Белкин А.С. К вопросу об использовании методики оценки риска для здоровья в целях гигиенической характеристики систем водоснабжения. *Гигиена и санитария*. 2017;96(7):686-689.

DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-7-686-689>

Fridman KB, Novikova YuA, Belkin AS. On the issue of the use of health risk assessment techniques for hygienic characteristics of water supply systems. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)* 2017;96(7):686-689. (In Russ.).

DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-7-686-689>

10. Дроздова Е.В., Сычик С.И., Сяхович В.Э., Походня Е.Н., Агабалаев А.А., Долгина Н.А. Содержание хлороформа в крови населения как биомаркер экспозиции побочными продуктами дезинфекции питьевой воды. *Медицинский журнал*. 2023;(1):23-32.

DOI: <https://doi.org/10.51922/1818-426X.2023.1.23>

Drozдова EV, Sychik SI, Syakhovich VE, Pakhadnia KN, Ahabalayev AA, Dalhina NA. Chloroform content in the blood of the population as a biomarker of exposure to drinking water disinfection by-products. *Medical Journal*. 2023;(1):23-32. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.51922/1818-426X.2023.1.23>

11. Drozdova EV, Kolesneva EV, Syakhovich VE, Dalhina NA. Polymorphisms of xenobiotic metabolism enzyme genes CYP2E1, GSTM1, GSTT1, EPHX1 as biomarkers of sensitivity to exposure to water disinfection byproducts (using chloroform as an example). *Health Risk Analysis*. 2023;1:157-170.

DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2023.1.15.eng>

12. Drozdova EV, Sychik SI, Hrynchak VA, Rjabceva SN. Experimental models of animal chronic pathology in assessing health risks for sensitive population groups. *Health Risk Analysis*. 2022;2:185-195.

DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.2.17.eng>

13. Дроздова Е.В., Бурая В.В., Гирина В.В., Суворец Т.З., Фираго А.В. К вопросу об образовании побочных продуктов дезинфекции питьевой воды (регламентируемых и эмерджентных), их генотоксических и канцерогенных свойствах: обзор проблемы и направления дальнейших исследований. В: *Здоровье и окружающая среда: рецензир. ежегод. сб. науч. тр. Минск: Науч.-практ. центр гигиены; 2016;26:12-16. [дата обращения 2024 Сентябрь 6]. Режим доступа: https://rspch.by/Docs/v26_sbornik.pdf*

Drozдова EV, Buraya VV, Girina VV, Suravets TZ, Firago AV. On the formation of drinking water disinfection by-products

(regulated and emergent), their genotoxicity and carcinogenic effects: review and perspectives for further studies. Minsk: Scientific and Practical Center of Hygiene; 2016;26:12-16. [date of access 2024 September 6]. Available from: https://rspch.by/Docs/v26_sbornik.pdf (In Russ.).

14. Дроздова Е.В. Обоснование актуализации гигиенического норматива бария в питьевой воде на основе данных о комплексном поступлении в организм и оценки рисков здоровью. В: *Здоровье и окружающая среда: рецензир. ежегод. сб. науч. тр. Минск: Науч.-практ. центр гигиены; 2022;32:21-34. [дата обращения 2024 Март 20]. Режим доступа: https://rspch.by/Docs/v32_sbornik.pdf*

Drozдова EV. Rationale for updating the hygienic standard for barium in drinking water based on data on complex intake and health risk assessment. In: *Health and Environment: peer-reviewed annual collection of scientific articles*. Minsk: Scientific and Practical Center of Hygiene; 2022;32:21-34. [date of access 2024 March 20]. Available from: https://rspch.by/Docs/v32_sbornik.pdf (In Russ.).

15. Будников Д.А., Бурая В.В., Дроздова Е.В., Лойко Н.К., Веремейчик Е.В. Нитраты в воде источников нецентрализованного питьевого водоснабжения Республики Беларусь: оценка влияния на состояние здоровья детей в возрасте до 6 лет. В: *Здоровье и окружающая среда: рецензир. ежегод. сб. науч. тр. Минск: Респ. науч.-практ. центр гигиены; 2012;21:309-318. [дата обращения 2024 Сентябрь 6]. Режим доступа: https://rspch.by/Docs/v21_sbornik.pdf*

Budnikov DA, Buraya VV, Drozdova EV, Lojko NK, Veremejchik EV. Nitrates in water from non-centralized drinking water supply sources in the Republic of Belarus: assessment of the impact on the health status of children under 6 years of age: peer-reviewed annual collection of scientific articles. Minsk: Republican Scientific and Practical Center of Hygiene; 2012; 21:309-318. [date of access 2024 September 6]. Available from: https://rspch.by/Docs/v21_sbornik.pdf (In Russ.).

16. Дроздова Е.В. Сравнительный анализ национальных показателей безопасности питьевой воды с международными, региональными и национальными стандартами развитых стран. В: *Здоровье и окружающая среда: рецензир. ежегод. сб. науч. тр. Минск: Науч.-практ. центр гигиены; 2018;28:5-20. [дата обращения 2024 Сентябрь 6]. Режим доступа: https://rspch.by/Docs/v28_sbornik.pdf*

Drozдова EV. Comparison of national hygienic standards of drinking water quality with international, regional requirements and national regulations of developed countries. In: *Health and Environment: peer-reviewed annual collection of scientific articles*. Minsk, Scientific and Practical Center of Hygiene; 2018;28:5-20. [date of access 2024 September 6]. Available from: https://rspch.by/Docs/v28_sbornik.pdf (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author

Дроздова Елена Валентиновна, к.м.н., доцент, заместитель директора по научной работе, Научно-исследовательский институт гигиены, токсикологии, эпидемиологии, вирусологии и микробиологии ГУ «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья», Минск, Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3032-0895>

e-mail: [drozdovaev@mail.ru](mailto:drozдоваev@mail.ru)

Alena V. Drazdova, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Science at the Research Institute of Hygiene, Toxicology, Epidemiology, Virology and Microbiology, Republican Center of Hygiene, Epidemiology and Public Health, Minsk, Belarus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3032-0895>

e-mail: [drozdovaev@mail.ru](mailto:drozдоваev@mail.ru)

Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Дроздова Елена Валентиновна

e-mail: [drozdovaev@mail.ru](mailto:drozдоваev@mail.ru)

Alena V. Drazdova

e-mail: [drozdovaev@mail.ru](mailto:drozдоваev@mail.ru)

Поступила в редакцию / Received 17.09.2024

Поступила после рецензирования / Accepted 07.10.2024

Принята к публикации / Revised 11.12.2024