

РИСК ЗДОРОВЬЮ НАСЕЛЕНИЯ, АССОЦИИРОВАННЫЙ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ДЕЗИНФЕКЦИИ В ПИТЬЕВОЙ ВОДЕ С УЧЕТОМ МНОЖЕСТВЕННОСТИ ПУТЕЙ ИХ ПОСТУПЛЕНИЯ

Дроздова Е. В.

*Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр гигиены»,
г. Минск, Республика Беларусь*

Реферат. В статье представлены результаты оценки рисков здоровью, ассоциированных с множественными путями поступления приоритетных тригалометанов с питьевой водой, прошедшей хлорирование. Разработанные оптимальные сценарии для оценки рисков здоровью, ассоциированных с содержанием летучих органических загрязнителей в питьевой воде (моделирование незначимых значений, стандартные и экспериментально установленные факторы экспозиции) позволили получить новые научные данные о дозовой нагрузке тригалометанами для трех возрастных групп населения при множественных путях их поступления в организм и сценариях, соответствующих центральной тенденции и максимально обоснованной экспозиции в фокусных районах г. Минска в 2018–2020 гг. Установлено, что ингаляционный путь поступления вносит существенно больший вклад в поступление тригалометанов в сравнении с пероральным и является ведущим в формировании рисков здоровью, особенно канцероген-

ных. Обоснованы методические основы применения данных о поступлении вещества различными путями из воды в организм для актуализации гигиенического норматива для вещества в среде.

Ключевые слова: питьевая вода, тригалометаны, хлороформ, оценка рисков, экспозиция, множественные пути поступления, канцерогенный риск.

Введение. Обеспечение населения безопасно питьевой водой, идентификация факторов риска для здоровья населения, ассоциированного с качеством питьевой воды, является одним из наиболее существенных и эффективных инструментов профилактики заболеваемости и укрепления здоровья населения.

Обеззараживание воды в системах централизованного водоснабжения — это неотъемлемый для снижения рисков передачи инфекционных заболеваний этап водоподготовки, особенно актуальный при использовании поверхностных водоисточников [1]. В то же время применение реагентных и комбинированных методов обеззараживания за счет взаимодействия реагентов с органическими веществами природного происхождения (в основном гуминовыми и фульвокислотами) сопровождается образованием в воде побочных продуктов дезинфекции (ППД). Смеси ППД имеют различный качественно-количественный состав, варьирующий в зависимости от содержания в исходной воде природных органических веществ и характеристик способа обеззараживания, в некоторых случаях в воде одновременно могут присутствовать более 400 ППД различных групп [2, 3, 4]. Тригалометаны (ТГМ) — группа ППД, присутствующих в наибольших концентрациях в хлорированной воде. Их содержание в воде коррелирует с уровнями содержания иных галогенированных ППД, причем содержание хлороформа превышает содержание всех остальных ТГМ [1–4]. В этой связи 4 ТГМ (хлороформ, дихлорбромметан, хлордибромметан и бромформ) рассматривают как индикаторные ППД при контроле безопасности воды после обеззараживания с учетом применяемых методов водоподготовки в условиях республики, а хлороформ принят ВОЗ ведущим индикаторным ТГМ.

При совместном хроническом воздействии даже в низких и следовых концентрациях ППД потенциально могут обуславливать риски здоровью экспонированного на-

селения, включая отдаленные эффекты. Согласно данным эпидемиологических исследований длительное употребление воды, содержащей смесь ТГМ, повышает риски развития нарушений течения беременности, рака мочевого пузыря и прямой кишки [1–4]. По доказанности канцерогенного действия хлороформ, бромформ и дихлорбромметан отнесены к возможным канцерогенам для человека (группа 2В МАИР). При этом в отличие от многих других веществ ТГМ, являясь летучими органическими соединениями, во время приема душа, ванной, хозяйственно-бытовой деятельности поступают в организм человека не только перорально, но и ингаляционным и кожно-резорбтивным путями. При высокой интенсивности хозяйственно-бытового водопользования (прием душа, ванной, купание детей, уборка, стирка и др.) именно эти пути могут вносить наибольший вклад в формирование суммарной суточной нагрузки ППД (ЕРА/600/R-06/087, Н. А. Егорова с соавт., 2013, J. R. Nuckols с соавт., 2005).

Учитывая появление новых данных о токсичности и опасности, уровнях экспозиции, за рубежом наметилась тенденция к ужесточению нормативов для ТГМ в питьевой воде [1]. Однако пересмотр национальных нормативов требует надежной доказательной базы с учетом условий водопользования в республике. Проведенные нами исследования позволили предложить ряд методических приемов, позволяющих снизить неопределенности при актуализации нормативов и оценок риска здоровью для веществ природного происхождения с учетом особенностей чувствительных групп населения к экзогенным загрязнителям на основе применения экспериментальных моделей патологии животных [5], для ксенобиотиков — за счет применения биомаркеров экспозиции и биомаркеров чувствительности [6, 7]. Однако методические основы учета множественных путей поступления химических веществ при нормировании и

оценке рисков здоровью заложены не были. Действующие ПДК учитывают лишь пероральный путь поступления.

В республике хлорирование как метод обеззараживания питьевой воды на постоянной основе применяется только частично в г. Минске для хозяйственно-питьевого водоснабжения из поверхностного водоемника (соответствует Московскому, Фрунзенскому, частично Октябрьскому районам). Учитывая высокие значения концентрации хлороформа в питьевой воде по данным ретроспективных исследований, а также способность хлороформа к суммации действия с другими ТГМ, актуальной являлась оценка уровней риска здоровью населения, ассоциированного с воздействием ТГМ в питьевой воде с учетом множественности путей экспозиции.

Цель работы — оценить уровень риска здоровью, формируемого содержанием тригалометанов в питьевой воде централизованной системы водоснабжения, с учетом множественности путей их поступления в организм и установить удельный вклад отдельных ТГМ и путей поступления в общую дозовую нагрузку.

Материалы и методы. Работа выполнялась в рамках заданий 01.01. «Разработать и внедрить методологию оценки безопасности способов обеззараживания воды по критериям потенциального канцерогенного риска от воздействия побочных продуктов дезинфекции» ОНТП «Здоровье и среда обитания», 2016–2020 гг. (рег. № НИОКР 20162304) и 01.01. «Разработать метод гигиенической оценки летучих химических веществ в питьевой воде» подпрограммы «Безопасность среды обитания человека» ГНТП «Научно-техническое обеспечение качества и доступности медицинских услуг», 2021–2025 годы (рег. № НИОКР 20190177).

Объектом исследования являлись уровни содержания ТГМ в питьевой воде централизованной системы водоснабжения г. Минска — на выходе со станций 2-го подъема и в распределительной сети (Московский и Фрунзенский районы — вне влияния подземных источников) в период 2018–2020 гг. с учетом сезонности. 8 ТГМ (хлороформ, 1,2-дихлорэтан, трихлорэтилен, тетрахлорэтилен, бромформ, дибромхлорметан, бромдихлорметан, тетрахлорэтан) определялись в

воде газохроматографическим методом (ИСО 10301-1997 «Качество воды. Определение легколетучих галогенизированных углеводородов. Методы газовой хроматографии»).

Оценка уровней риска здоровью населения, связанного с использованием воды централизованных систем питьевого водоснабжения, содержащей ТГМ, проводилась с использованием разработанного метода оценки риска для здоровья населения, обусловленного воздействием химических веществ, загрязняющих питьевую воду (инструкция по применению № 019-1221, утвержденная заместителем Министра — Главным государственным санитарным врачом Республики Беларусь 28.01.2022).

На этапе «идентификация опасности» проведен отбор приоритетных ТГМ, установлены вредные эффекты, которые могут быть вызваны данными химическими веществами при пероральном пути поступления их в организм человека. На этапе «оценка экспозиции» установлены фактические дозовые нагрузки ТГМ для различных возрастных групп населения при употреблении воды для питьевых и хозяйственно-бытовых целей (с учетом перорального, ингаляционного и кожного поступления). Расчет хронического среднесуточного поступления (дозы) ТГМ выполнен для трех групп населения: дети 0–6 лет, дети 6–18 лет и взрослые (старше 18 лет) на основании результатов лабораторных исследований питьевой воды и факторов экспозиции (продолжительности воздействия — 30/70 лет, масса тела — 15 кг, 42 кг и 70 кг соответственно). С целью повышения надежности при оценке экспозиции проводилось моделирование незначительных результатов («ниже предела обнаружения») с использованием для замещающих значений по двум вариантам: 0 мг/дм³ и нижнего предела количественного определения метода соответствующего вещества (ПКО). Расчет дозы ТГМ проводился по двум сценариям, предполагавшим использование стандартных и установленных в исследовании факторов экспозиции (уровни водопользования), обоснование приведено ниже.

На этапе «оценка зависимости доза–ответ» проведен расчет и дана оценка потенциального риска неспецифических ток-

сических эффектов и канцерогенного риска с учетом множественных путей поступления ТГМ с водой.

Для статистической обработки промежуточных результатов исследования были созданы базы данных в MS Excel. Проверка гипотезы о виде распределения полученных данных была выполнена с использованием критерия Шапиро – Уилка (W -тест) и Колмогорова – Смирнова с поправкой Лиллиефорса. При описании результатов были использованы общепринятые показатели — средние значения (M), минимальные (\min) и максимальные значения (\max), интерквартильный размах ($P_{25}–P_{75}$) и 95-й перцентиль (P_{95}). Анализ статистической значимости межгрупповых различий количественных признаков проводили с помощью t -критерия. Уровень статистической значимости принят $p < 0,05$. Статистическая обработка и анализ полученных данных проводились с использованием пакета статистических программ Statistica 13 (лицензия № AXA8111525627ARCN2ACD-M), Microsoft Office Excel 2019.

Результаты и их обсуждение. Анализ результатов лабораторных исследований показал отсутствие статистически значимых различий между концентрациями хлороформа и других ТГМ в воде Фрунзенского и Московского районов, а также в различных точках отбора в пределах одного района ($p > 0,05$). В этой связи в дальнейшем анализ экспозиции и риска проводился по обобщенным данным по двум районам (далее по тексту приведены данные в среднем по этим двум районам, используется сокращение «по городу»).

По данным лабораторных исследований в период 2018–2020 гг., во всех исследованных пробах воды определялся хлороформ. Концентрации хлороформа в воде на выходе со станций 2-го подъема фиксировались в пределах 0,05–0,18 мг/дм³, среднееголетние (за три года) значения составили $0,10 \pm 0,03$ мг/дм³ (95% ДИ: 0,10–0,11 мг/дм³), в воде разводящей сети — от 0,01 до 0,19 мг/дм³, среднееголетние значения $0,12 \pm 0,02$ мг/дм³ (95% ДИ: 0,11–0,12 мг/дм³). Концентрации выше средних значений отмечались с июня по сентябрь с максимальными значениями в августе — сентябре, различия между средними значениями концен-

траций в летний и зимний сезоны до 1,2 раз, статистически значимы ($p = 0,01$). Среди других ТГМ наибольший удельный вес определяемых проб отмечен для бромдихлорметана. Полученные результаты подтверждают данные научной литературы о том, что образование ТГМ происходит и после поступления хлорированной воды в водопроводную сеть, из-за чего концентрация этих веществ возрастает по мере продвижения питьевой воды к потребителю (в воде распределительной сети среднееголетние значения выше, чем в воде на выходе со станции 2-го подъема). Особое значение это приобретает для отдаленных точек распределительной сети с малой интенсивностью водозабора [1].

В ходе проведенных исследований было установлено, что в целом на территории фокусных районов г. Минска потенциальный риск немедленного действия по показателям интенсивности запаха (привкуса), цветности и мутности питьевой воды характеризуется приемлемым уровнем ($Risk = 0,02$ долей ед.). Периодически, преимущественно в весенне-летний период, значения потенциального риска немедленного действия по показателям интенсивности запаха (привкуса) и мутности питьевой воды достигают удовлетворительного уровня ($Risk = 0,16$ долей ед.). При удовлетворительном уровне риска немедленного действия возможны случаи жалоб населения на различные дискомфортные состояния, связанные с воздействием оцениваемого фактора. Потенциальный риск немедленного действия тетрахлорэтана, нормируемого по влиянию на органолептические показатели воды, оценивается как приемлемый ($Risk = 0,02$ долей ед.). При приемлемом уровне риска немедленного действия исключается рост заболеваемости населения, связанный с воздействием оцениваемого фактора, а состояние дискомфорта может проявляться лишь в единичных случаях у особо чувствительных людей.

По результатам исследований с учетом наличия определений ТГМ в концентрациях выше предела количественного определения метода в перечень приоритетных веществ для оценки риска здоровью при хроническом воздействии вошли 4 ТГМ (хлороформ, бромформ, дибромхлорметан, бромдихлорме-

тан). Проведен расчет величины среднесуточной дозы ТГМ при пероральном, ингаляционном и накожном пути поступления четырех приоритетных ТГМ из питьевой воды разводящей сети по двум смоделированным сценариям, результаты расчета доз приведены в таблице 1.

Сценарий 1 — (характеристика средней тенденции): средние значения концентрации ТГМ с учетом замены незначущих значений на «0», стандартные уровни водопотребления (взрослые 2 л/сутки, дети 0–6 лет — 0,67 л /сутки, дети 6–18 лет — 1 л/сутки) и хозяйственно-бытового водопользования (частота и длительность принятия душа, ванной — по медиане), частота экспозиции — 350 дней;

Сценарий 2 — (максимальная обоснованная экспозиция): 95%-я доверительная граница средних концентраций ТГМ с учетом замены незначущих значений на ПКО, высокие уровни водопотребления (взрослые — 3 л/сутки (округленное значение P95, установленное в собственных исследованиях), дети 0–6 лет — 1 л /сутки, дети 6–18 лет — 1,5 л/сутки) и хозяйственно-бытового водопользования (95-й процентиль частоты и длительности принятия душа, ванной), частота экспозиции — 365 дней. При описании результатов исследования по тексту результаты исследований по сценарию 2 приводятся в скобках с индексом «м» после результатов по центральной тенденции (например, 0,2 % (0,1 %)м).

Таблица 1 — Результаты расчета величины среднесуточной дозы при пероральном, ингаляционном и накожном пути поступления приоритетных ТГМ

Показатель	Хлороформ	Бромдихлор-метан	Дибромхлор-метан	Бромоформ
	CAS			
	67-66-3	75-27-4	124-48-1	75-25-2
Концентрация, мг/дм ³ :				
средняя	0,1150	0,0010	0,0010	0,0010
верхний 95 % ДИ средней	0,1208	0,0012	0,0010	0,0010
Доза для оценки центральной тенденции, мг/(кг·сут)				
Взрослые:				
пероральное поступление	0,003285	0,000028	0,000029	0,000029
ингаляционное поступление	0,022140	0,003538	0,002048	0,001162
накожное поступление	0,000293	0,000002	0,000002	0,000002
Дети 6–18 лет:				
пероральное поступление	0,002738	0,000023	0,000024	0,000024
ингаляционное поступление	0,022140	0,003538	0,002048	0,001162
накожное поступление	0,000356	0,000002	0,000002	0,000002
Дети до 6 лет:				
пероральное поступление	0,005136	0,000043	0,000045	0,000045
ингаляционное поступление	0,022140	0,003538	0,002048	0,001162
накожное поступление	0,000529	0,000003	0,000003	0,000003
Доза для оценки максимальной обоснованной экспозиции, мг/(кг·сут)				
Взрослые:				
пероральное поступление	0,005176	0,000052	0,000044	0,000043
ингаляционное поступление	0,023255	0,004406	0,002085	0,001162
накожное поступление	0,000308	0,000002	0,000002	0,000002
Дети 6–18 лет:				
пероральное поступление	0,004313	0,000043	0,000037	0,000036
ингаляционное поступление	0,023255	0,004406	0,002085	0,001162
накожное поступление	0,000374	0,000002	0,000002	0,000002
Дети до 6 лет:				
пероральное поступление	0,008052	0,000080	0,000069	0,000067
ингаляционное поступление	0,023255	0,004406	0,002085	0,001162
накожное поступление	0,000556	0,000004	0,000003	0,000003

Удельный вклад перорального и ингаляционного путей поступления в формирование дозы для взрослого населения хлороформа составляет соответственно 12,8 % (18,0 %)м и 86,1 % (80,9 %)м, бромдихлорметана — 0,8 % (1,2 %)м и 99,2 % (98,8 %)м, дибромхлорметана — 1,4 % (2,1 %)м и 98,5 % (97,8 %)м, бромоформа — 2,4 % (3,6 %)м и 97,5 % (96,3 %)м. Удельный вклад кожного пути экспозиции незначителен (не более 1 % для всех веществ). При расчете дозы

для максимальной экспозиции увеличивается вклад перорального пути поступления и снижается вклад ингаляционного пути поступления для 4 ТГМ. Дозовая нагрузка для детей до 6 лет выше, чем для других возрастных групп, для детей в возрасте 6–18 лет близка к нагрузке для взрослых.

Результаты установления величины потенциального канцерогенного риска представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Результаты установления величины потенциального канцерогенного риска при множественных путях поступления из воды приоритетных ТГМ, обладающих беспороговым (канцерогенным) механизмом воздействия

Показатель	Хлороформ	Бромдихлорметан	Дибромхлорметан	Бромоформ	Суммарный риск
	CAS				
	67-66-3	75-27-4	124-48-1	75-25-2	
Потенциальный канцерогенный риск (для оценки центральной тенденции)					
Взрослые:					
пероральное поступление	2,00E-05	1,71E-06	2,44E-06	2,26E-07	2,44E-05
ингаляционное поступление	1,79E-03	4,60E-04	1,93E-04	4,53E-06	2,45E-03
накожное поступление	1,79E-06	1,01E-07	1,50E-07	1,43E-08	2,05E-06
Дети 6–18 лет:					
пероральное поступление	1,67E-05	1,43E-06	2,03E-06	1,88E-07	2,03E-05
ингаляционное поступление	1,79E-03	4,60E-04	1,93E-04	4,53E-06	2,45E-03
накожное поступление	2,17E-06	1,23E-07	1,81E-07	1,74E-08	2,49E-06
Дети до 6 лет:					
пероральное поступление	3,13E-05	2,67E-06	3,81E-06	3,53E-07	3,82E-05
ингаляционное поступление	1,79E-03	4,60E-04	1,93E-04	4,53E-06	2,45E-03
накожное поступление	3,23E-06	1,83E-07	2,70E-07	2,58E-08	3,71E-06
Потенциальный канцерогенный риск (максимально обоснованная экспозиция)					
Взрослые:					
пероральное поступление	3,16E-05	3,20E-06	3,72E-06	3,39E-07	3,88E-05
ингаляционное поступление	1,88E-03	5,73E-04	1,96E-04	4,53E-06	2,66E-03
накожное поступление	1,88E-06	1,26E-07	1,52E-07	1,43E-08	2,17E-06
Дети 6–18 лет:					
пероральное поступление	2,63E-05	2,66E-06	3,10E-06	2,82E-07	3,24E-05
ингаляционное поступление	1,88E-03	5,73E-04	1,96E-04	4,53E-06	2,66E-03
накожное поступление	2,28E-06	1,53E-07	1,85E-07	1,74E-08	2,63E-06
Дети до 6 лет:					
пероральное поступление	4,91E-05	4,97E-06	5,79E-06	5,27E-07	6,04E-05
ингаляционное поступление	1,88E-03	5,73E-04	1,96E-04	4,53E-06	2,66E-03
накожное поступление	3,39E-06	2,28E-07	2,75E-07	2,58E-08	3,92E-06

Установлено, что при пероральном пути поступления четырех приоритетных ТГМ из питьевой воды суммарный потенциальный канцерогенный риск оценивается как «средний» $CR_{w_0} = 2,01E-05 - 3,82E-05$ (3,24E-05 — 6,04E-05)м, при этом вклад хлоро-

роформа в его формирование составляет 81,1 % (82,1 %)м, бромдихлорметана — 7,0 % (8,2 %)м, дибромхлорметана — 10,0 % (9,6 %)м, бромоформа — 0,9 %. Появление такого риска требует проведения динамического контроля с углубленным изучением

источников и возможных последствий неблагоприятных воздействий для решения вопроса о мерах по управлению риском.

Суммарный потенциальный канцерогенный риск при ингаляционном пути поступления четырех приоритетных ТГМ из питьевой воды оценивается как «высокий» $CR_{wi} = 2,45E-03$ ($2,66E-03$)^м, вклад хлороформа в его формирование составляет 73,2 % (70,9 %) ^м, бромдихлорметана — 18,8 % (21,6 %) ^м, дибромхлорметана — 7,9 % (7,4 %) ^м, бромформа — 0,2 %. При данном уровне риска необходимо осуществление мероприятий по устранению или снижению риска.

Суммарный потенциальный канцерогенный риск при накожном пути поступления четырех приоритетных ТГМ из питьевой воды оценивается как «допустимый» ($CR_{wd} = 2,05E-06$ — $3,71E-06$ ($2,17E-06$ — $3,92E-06$)^м), вклад хлороформа в его формирование составляет 87,1 % (86,5 %) ^м, бромдихлорметана — 4,9 % (5,8 %) ^м, дибромхлорметана — 7,3 % (7,1 %) ^м, бромформа — 0,7 %. Уровни допустимого риска подлежат постоянному контролю. В некоторых случаях при таких уровнях риска могут проводиться дополнительные мероприятия по их снижению.

Согласно проведенным расчетам суммарный потенциальный канцерогенный риск при множественных путях поступления четырех приоритетных ТГМ из питьевой воды оценивается как «высокий» $CR_w = 2,5E-03$ ($2,7E-03$)^м и требует осуществления мероприятий по его устранению или снижению. Вклад хлороформа в его формирование составляет 73,2 %, бромдихлорметана — 18,6 %, дибромхлорметана — 7,9 %, бромформа — 0,2 %. При этом удельный вклад перорального пути составляет в зависимости от возрастной группы не более 1,5 % (1,4 %) ^м, ингаляционного — 98,3 — 99,1 % (97,6—98,5 %) ^м, накожного 0,08—0,15 %. Добавочный суммарный популяционный потенциальный канцерогенный риск, ассоциированный с поступлением четырех приоритетных ТГМ из питьевой воды при хозяйственно-питьевом водопользовании для населения 2 районов составит $4,1E-09$ ($4,5E-09$)^м для взрослых, $2,5E-08$ ($2,7E-08$)^м для детей 6—18 лет и $3,6E-08$ ($3,9E-08$)^м для детей до 6 лет. Наи-

более уязвимой группой населения являются дети до 6 лет — для них характерны более высокие значения канцерогенных рисков.

Потенциальный риск хронического воздействия, связанный с регулярным употреблением питьевой воды, содержащей ТГМ, оценивался по эффектам неспецифического токсического действия. Согласно расчетам в целом на территории фокусных районов г. Минска в период 2018—2020 гг. потенциальный риск развития неспецифических токсических эффектов, обусловленный содержанием в питьевой воде 4 ТГМ, характеризовался приемлемым уровнем при пероральном поступлении ($Risk = 0,05$ долей ед.) вне зависимости от сезона. Основной вклад в формирование величины суммарного риска развития неспецифических токсических эффектов в различные годы исследуемого периода вносил хлороформ (до 88,3 %), бромдихлорметан и дибромхлорметан до 5,5 и 5,7 % соответственно, бромформа не более 1,5 %.

Оценка риска влияния ТГМ на критические органы/системы проводилась на основании расчета значений индексов опасности острого и хронического воздействия. В качестве критических рассматривались органы/системы, в которых при возрастании концентраций ТГМ возникает первый вредный эффект или его известный предвестник. В соответствии с методологией оценки риска здоровью населения, критическими органами/системами для ТГМ являются почки, печень, эндокринная, центральная нервная и сердечно-сосудистая системы.

По результатам расчетов за исследуемый период индекс опасности развития неблагоприятных эффектов со стороны центральной нервной системы, эндокринной системы, со стороны печени, включая индукцию микросомальных ферментов, обусловленный воздействием ТГМ при пероральном пути поступления, оценивается как низкий и средний для взрослых и детей в возрасте 6—18 лет, для детей в возрасте до 6 лет — средний. Индекс опасности развития неблагоприятных эффектов со стороны центральной нервной системы, эндокринной системы, со стороны печени, включая индукцию микросомальных ферментов, обусловленный воздействием ТГМ при множественных путях

поступления (HI_w) оценивается как средних, а эффектов на развитие — низкий для взрослых и детей в возрасте от 6 до 18 лет. Наиболее уязвимой возрастной группой являются дети до 6 лет — значение HI_w для развития неблагоприятных эффектов со стороны центральной нервной системы и со стороны печени, включая индукцию микросомальных ферментов, оцениваются как высокие. В среднем вклад перорального пути в формирование многосредового индекса опасности составляет от 62,5 до 71,3 %, ингаляционного — 24,5–40,3 %, кожного — не более 6,6 % в зависимости от возраста и сценария (вклад перорального пути поступления выше для сценария с максимальной экспозицией), наибольший вклад вносит хлороформ (до 88 %).

Заключение. Таким образом, химическая нагрузка, обусловленная водоподготовкой, характеризуется спектром химических веществ, обладающих санитарно-токсикологическими и канцерогенными свойствами. Концентрации химических веществ, образующиеся в воде во время водоподготовки, не превышают установленных гигиенических нормативов, однако их суммарное содержание выше регламентируемого уровня. Применение методологии оценки риска здоровью позволяет провести оценку динамики качества и безопасности питьевой воды от водозабора до потребителя и оценить потенциальный риск здоровью, эффективность применяемых методов водоподготовки.

Разработанные оптимальные сценарии для оценки рисков здоровью, ассоциированных с содержанием летучих органических загрязнителей в питьевой воде (моделирование незначительных значений, стандартные и экспериментально установленные факторы экспозиции) позволили получить новые научные данные о дозовой нагрузке ТГМ для трех возрастных групп населения при множественных путях их поступления в организм и сценариях, соответствующих центральной тенденции и максимально обоснованной экспозиции в фокусных районах г. Минска в 2018–2020 гг. Доказано, что наиболее уязвимой возрастной группой являются дети до 6 лет. Установлено, что ингаляционный путь поступления вносит существенно больший вклад в формирование дозы ТГМ в сравне-

нии с пероральным — в 6,7 раз выше для хлороформа, в 128,2 раза выше для бромдихлорметана, в 70,6 раза выше для дибромхлорметана, в 40,7 раз для бромоформа. Удельный вклад кожного пути экспозиции незначителен (не более 1 % для всех веществ).

Потенциальный риск развития неспецифических токсических эффектов, обусловленный содержанием в питьевой воде четырех ТГМ, характеризовался приемлемым уровнем вне зависимости от сезона. Индекс опасности развития неблагоприятных эффектов со стороны центральной нервной системы, эндокринной системы, со стороны печени, включая индукцию микросомальных ферментов, обусловленный воздействием ТГМ при множественных путях поступления (HI_w), оценивается как средний, а эффектов на развитие — низкий для взрослых и детей в возрасте от 6 до 18 лет. Наиболее уязвимой возрастной группой являются дети до 6 лет — значение HI_w для развития неблагоприятных эффектов со стороны центральной нервной системы и со стороны печени, включая индукцию микросомальных ферментов, оцениваются как высокие.

Суммарный потенциальный канцерогенный риск при множественных путях поступления четырех приоритетных ТГМ из питьевой воды выше значений риска, установленных только при пероральном поступлении, оценивается как «высокий» и требует осуществления мероприятий по его устранению или снижению. При этом удельный вклад перорального пути составляет в зависимости от возрастной группы не более 1,5 % («средний»), ингаляционного до 99,1 % («высокий»), кожного 0,08–0,15 % («допустимый»). Вклад хлороформа в его формирование составляет 73,2 %, бромдихлорметана — 18,6 %, дибромхлорметана — 7,9 %, бромоформа — 0,2 %.

Результаты исследований позволили сделать вывод о том, что неучет ингаляционного и кожного путей поступления летучих органических веществ (ТГМ) в организм ведет к существенной недооценке рисков здоровью, особенно при оценке канцерогенных рисков здоровью с учетом более высокого канцерогенного потенциала веществ при ингаляционном поступлении. Это необходи-

мо учитывать при проведении соответствующих оценок риска здоровью с целью принятия профилактических мер (например, при замене метода водоподготовки, сравнительной оценке эффективности различных методов обеззараживания) или гигиеническом нормировании летучих органических веществ в питьевой воде.

Наличие данных о поступлении веществ в организм ингаляционным и накожным путями в организм из воды при хозяйственно-бытовом водопользовании могут служить одним из оснований для актуализации гигиенического норматива для вещества в среде по критериям риска здоровью. При гигиеническом нормировании химических веществ в питьевой воде с учетом множественности путей поступления химических веществ в организм из питьевой воды целесообразно ориентироваться на систему критериев приемлемости. В качестве приемлемого уровня риска по значению индекса опасности целесообразно использовать значение $HI \leq 1,0$, величина пожизненного приемлемого (минимального) уровня риска (70 лет) для химических канцерогенов в пи-

тывой воде — от $1 \cdot 10^{-5}$, а для доказанных канцерогенов для человека — на уровне от $1 \cdot 10^{-6}$. Разработан метод гигиенического нормирования химических веществ в питьевой воде по критериям риска здоровью, формализованный в инструкции по применению № 031-1221 (утверждена заместителем Министра здравоохранения — Главным государственным санитарным врачом Республики Беларусь 11 мая 2022 г.). Положения инструкции могут использоваться для обоснования необходимости гармонизации гигиенических нормативов химических веществ в питьевой воде с наилучшими международными рекомендациями; изучения региональных особенностей формирования общей химической нагрузки на население, для обоснования гигиенических нормативов химических веществ в средах по критериям риска здоровью.

Полученные результаты исследований могут быть в перспективе использованы при актуализации гигиенических нормативов для ТГМ в питьевой воде с учетом множественных путей поступления их в организм из питьевой воды.

Список цитированных источников

1. Guidelines for Drinking-water Quality / World Health Organization. — 4th ed. with adds. — Geneva, 2017. — 564 p.
2. Sharma, V. K. Formation and toxicity of brominated disinfection byproducts during chlorination and chloramination of water: a review / V. K. Sharma, R. Zboril, T. J. McDonald // J. Environ Sci Health B. — 2014. — Vol. 49, № 3. — P. 212–228.
3. Insights to estimate exposure to regulated and non-regulated disinfection by-products in drinking water / P. E. Redondo-Hasselerharm [et al.] // J. Expo Sci Environ Epidemiol. — 2022. — Vol. 29. — P. 1–11.
4. К вопросу об образовании побочных продуктов дезинфекции питьевой воды (регламентируемых и эмерджентных), их генотоксических и канцерогенных свойствах: обзор проблемы и направления дальнейших исследований / Е. В. Дроздова [и др.] // Здоровье и окружающая среда : сб. науч. тр. / М-во здравоохранения Респ. Беларусь, Науч.-практ. центр гигиены ; гл. ред. С. И. Сычик. — Минск : РНМБ, 2016. — Вып. 26. — С. 12–16.
5. Drozdova, E. V. Experimental models of animal chronic pathology in assessing health risks for sensitive population groups / E. V. Drozdova, S. I. Sychik, V. A. Hrynchak, S. N. Rjabceva // Health Risk Analysis. — 2022. — № 2. — P. 185–195.
6. Содержание хлороформа в крови населения как биомаркер экспозиции побочными продуктами дезинфекции питьевой воды / Е. В. Дроздова [и др.] // Медицинский журнал. — 2023. — № 1. — С. 23–32.
7. Drozdova, E. V. 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) / E. V. Drozdova, E. V. Kolesneva, V. E. Syakhovich, N. A. Dalhina // Health Risk Analysis. — 2023. — № 1. — P. 157–170. DOI: 10.21668/health.risk/2023.1.15.eng.



Health risk associated with health effects of disinfection by-products in drinking water, taking in context of multiple pathways exposure

Drozdova E. V.

Scientific Practical Centre of Hygiene, Minsk, Republic of Belarus

The developed scenarios for health risks assessment associated with the content of volatile organic pollutants in drinking water allowed to obtain new scientific data on the exposure of high priority trihalomethanes for three age groups of the population under multiple pathways of their intake into the body and 2 scenarios in the focal microregions of Minsk in 2018–2020. It was found that the inhalation route makes the significantly greater contribution to the trihalomethanes exposure compared to the oral route and is the leading one in the formation of health risks, especially carcinogenic ones. Methodological bases of application of data on substance intake by different ways from water into organism for actualization of hygienic standard for substance in the environment has been substantiated.

Keywords: drinking water, trihalomethanes, chloroform, risk assessment, exposure, multiple routes of entry, carcinogenic risk.

Поступила 12.07.2023