

Марченко Б.И.^{1,2}, Журавлев П.В.³, Плуготаренко Н.К.¹, Юхно А.И.¹

Оценка канцерогенного риска от воздействия хлорорганических соединений в воде систем централизованного водоснабжения

¹ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» Минобрнауки России, 344006, Ростов-на-Дону, Россия;²Филиал ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Ростовской области» в городе Таганроге, 347930, Таганрог, Россия;³ФБУН «Ростовский НИИ микробиологии и паразитологии» Роспотребнадзора, 344000, Ростов-на-Дону, Россия

Введение. Проблема обеспечения населения водой с гарантированными параметрами качества, безопасности и физиологической полноценности высокоактуальна для многих регионов России. Применение для обеззараживания воды хлорирования является потенциальной причиной образования в ней сверхнормативных концентраций хлорорганических соединений, в том числе тригалогенметанов, что обуславливает повышенные уровни канцерогенного риска.

Материалы и методы. Объектом исследования являлись: данные о содержании в воде систем централизованного водоснабжения канцерогенных хлорорганических соединений – хлороформа, дихлорбромметана и хлордибромметана; сведения о заболеваемости населения злокачественными новообразованиями; результаты эксперимента по оценке эффективности метода предварительной аммонизации. В работе использованы методы оценки риска здоровью, вариационной статистики и математического моделирования.

Результаты. Применение в городе Таганроге предварительной аммонизации предотвращает образование тригалогенметанов и обеспечивает поддержание индивидуального многомаршрутного канцерогенного риска на допустимом уровне ($9,933 \cdot 10^{-6}$). Систематическое необоснованное гиперхлорирование речной воды без предварительной аммонизации является основной причиной сверхнормативного содержания хлорорганических соединений и высокого уровня индивидуального канцерогенного риска в Приморском сельском поселении Неклиновского района – до $3,234 \cdot 10^{-3}$ в 2015 г. Моделирование на основе данных экспериментального хлорирования природной воды свидетельствует о высокой эффективности предварительной аммонизации при режиме обеззараживания, который обеспечивает содержание свободного общего активного хлора в водопроводной воде в пределах от 0,8 до 1,2 мг/л.

Заключение. Подтверждена высокая эффективность применения предварительной аммонизации природной воды для предотвращения образования тригалогенметанов и снижения канцерогенного риска. Приоритетным фактором образования сверхнормативного количества хлорорганических соединений в водопроводной воде является её гиперхлорирование. К перспективным мероприятиям по снижению канцерогенного риска от тригалогенметанов в водопроводной воде относятся систематический мониторинг их содержания, применение предварительной аммонизации, точная дозировка хлора, глубокая очистка исходной воды до хлорирования, замена первичного хлорирования на обеззараживание ультрафиолетовым излучением и др.

Ключевые слова: оценка риска; злокачественные новообразования; канцерогенный риск; социально-гигиенический мониторинг; хлорирование воды; хлорорганические соединения

Для цитирования: Марченко Б.И., Журавлев П.В., Плуготаренко Н.К., Юхно А.И. Оценка канцерогенного риска от воздействия хлорорганических соединений в воде систем централизованного водоснабжения. *Гигиена и санитария*. 2021; 100 (1): 99-110. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-99-110>

Для корреспонденции: Марченко Борис Игоревич, доктор мед. наук, профессор кафедры техносферной безопасности и химии Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» Минобрнауки России, 347928, Таганрог. E-mail: borismarch@gmail.com

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-35-00489.

Участие авторов: Марченко Б.И. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, статистическая обработка, написание текста. Журавлев П.В. – концепция и дизайн исследования, редактирование. Плуготаренко Н.К. – сбор и обработка материала, статистическая обработка. Юхно А.И. – сбор и обработка материала, проведение экспериментальных исследований. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Поступила 20.01.2020 / Принята к печати 18.09.2020 / Опубликована 30.03.2021

Boris I. Marchenko^{1,2}, Petr V. Zhuravlev³, Nina K. Plugotarenko¹, Aleksandra I. Yuhno¹

Assessment of carcinogenic risk from exposure to chlororganic compounds of water of systems of centralized water supply

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation;²The branch of the Center of Hygiene and Epidemiology in the Rostov region, Taganrog, 347930, Russian Federation;³Rostov Research Institute of Microbiology and Parasitology, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

Introduction. The problem of providing the population with drinking water with guaranteed quality, safety, and physiological usefulness is highly relevant for many regions of Russia. The use of chlorination for disinfection of the water is a potential cause of the formation of excess concentrations of organochlorine compounds in it, including trihalogenomethanes, which leads to elevated levels of carcinogenic risk.

The study's object was: data on the content in water of centralized water supply systems of carcinogenic organochlorine compounds - chloroform, dichlorobromomethane and chlorodibromomethane.

Material and methods. Information on the incidence of the population of malignant neoplasms; the results of an experiment to evaluate the effectiveness of the preliminary ammonization method. The paper used methods of health risk assessment, variation statistics, and mathematical modeling.

Results. The use of preliminary ammonization in Taganrog prevents the formation of trihalogenomethanes and ensures the maintenance of an individual multi-route carcinogenic risk at an acceptable level ($9.933 \cdot 10^{-6}$). Systematic unreasonable hyper chlorination of river water without prior ammoniation is the main reason for the excess content of chlororganic compounds and the high level of individual carcinogenic risk in the Primorsky rural settlement of the Neklinovsky District - up to $3.234 \cdot 10^{-3}$ in 2015. Modeling on the basis of experimental chlorination of natural water indicates the high efficiency of preliminary ammonization in the disinfection mode, which ensures the content of free total active chlorine in tap water in the range from 0.8 to 1.2 mg/l.

Conclusion. The high efficiency of the application of preliminary ammonization of natural water to prevent the formation of trihalogenomethanes and reduce carcinogenic risk has been confirmed. The priority factor for the formation of excess amounts of organochlorine compounds in drinking water is its hyper chlorination. Promising measures to reduce the carcinogenic risk of trihalogenomethanes in tap water include the systematic monitoring of their content, the use of preliminary ammonization, the exact dosage of chlorine, the deep purification of the source water before chlorination, the replacement of primary chlorination with ultraviolet disinfection, and others.

Keywords: risk assessment; malignant neoplasm; carcinogenic risk; socio-hygienic monitoring; water chlorination; chlororganic compounds

For citation: Marchenko B.I., Zhuravlev P.V., Plugotarenko N.K., Yuhno A.I. Assessment of carcinogenic risk from exposure to chlororganic compounds of water of systems of centralized water supply. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 100 (2): 99–110. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-99-110> (In Russ.)

For correspondence: Boris I. Marchenko, MD, Ph.D., DSci, professor of the department of the technosphere safety and chemistry of the Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering of the Southern Federal University Russia, Taganrog, 347928, Russian Federation. E-mail: borismarch@gmail.com

Information about the authors:

Marchenko B.I., <https://orcid.org/0000-0001-6173-329X>

Zhuravlev P.V., <https://orcid.org/0000-0002-8196-3882>

Plugotarenko N.K., <https://orcid.org/0000-0003-0853-8510>

Yuhno A.I., <https://orcid.org/0000-0002-9871-9261>

Acknowledgements. The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-35-00489.

Conflict of interest. Authors declare about lack of the conflict of interests.

Contribution of the authors: Marchenko B.I. – research concept and design, material collection and processing, statistical processing, writing a text; Zhuravlev P.V. – research concept and design, editing; Plugotarenko N.K. – material collection and processing, statistical processing; Yuhno A.I. – material collection and processing, experimental research. All co-authors – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Received: January 20, 2020 / Accepted September 18, 2020 / Published: March 30, 2021

Введение

Проблема обеспечения населения питьевой водой с гарантированными параметрами качества, безопасности и физиологической полноценности сохраняет свою высокую актуальность для многих регионов России [1–5]. Один из аспектов указанной проблемы связан с тем, что основным способом обеспечения безопасности водопроводной воды в эпидемическом отношении остаётся её химическое обеззараживание на основе применения хлора или хлорсодержащих реагентов, так как практически отсутствует возможность полного отказа от них при использовании в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения воды поверхностных источников [6, 7]. Однако применение обеззараживания воды методом хлорирования является потенциальной причиной образования в ней сверхнормативных концентраций летучих хлорорганических соединений (ЛХС), в том числе тригалогенметанов (ТГМ), что приводит к формированию повышенных уровней как канцерогенного, так и неканцерогенного риска, проявляющегося в увеличении частоты патологических нарушений со стороны печени, почек, миокарда, системы крови, нервной и нейроэндокринной систем [6, 8–11]. Результаты многочисленных исследований подтверждают наличие канцерогенных эффектов, обусловленных содержащимися в водопроводной воде хлороформом и другими ТГМ, которые проявляют себя как эпигенетические промоторы канцерогенеза при пероральном, ингаляционном и накожном воздействии в рамках многомаршрутной экспозиции [4, 8–20]. Именно поэтому как важный компонент системы социально-гигиенического мониторинга рассматривается интегральная оценка потенциальных неблагоприятных эффектов для здоровья населения, реализуемая в рамках динамического наблюдения за содержанием в водопроводной воде ТГМ и базирующаяся на современной методологии оценки риска здоровью населения с учётом параметров их многомаршрутной суммарной экспозиции [21–26]. Как эффективные методы устранения или минимизации канцерогенных рисков, связанных с образованием ТГМ при обеззараживании воды методом хлорирования, рассматриваются такие как оптимизация технологий водоподготовки с применением обеззараживания ультрафиолетовым облучением или комбинированного метода обеззараживания, сочетающего преаммонизацию с последующим хлорированием, и ряд других [7, 27, 28]. В современных условиях результаты динамического наблюдения за канцерогенным потенциалом различных компонентов среды обитания, включая водопроводную воду, с последующим выходом на оценку риска

здоровью населения служат надёжной основой целевого планирования и разработки оптимизационных управленческих решений [1, 5, 25].

Целью работы является сравнительная характеристика потенциального канцерогенного риска, обусловленного ТГМ, содержащимися в водопроводной воде систем централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения с различными технологиями водоподготовки в городе Таганроге и двух сельских поселениях сопредельного Неклиновского района Ростовской области, а также экспериментальная оценка эффективности применения преаммонизации для предупреждения образования ТГМ при обеззараживании воды методом хлорирования.

Материалы и методы

Использованы сведения о результатах исследований воды на выходе из насосных систем централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения на содержание трёх ТГМ – хлороформа (ХФ), дихлорбромметана (ДХБМ) и хлордихлорбромметана (ХДБМ), выполненных в рамках социально-гигиенического мониторинга в соответствии с ГОСТ Р 51392-99 «Вода питьевая. Определение содержания летучих галогенорганических соединений газожидкостной хроматографией» (372 пробы за период 2012–2018 гг.). Эксперимент по оценке эффективности применения метода преаммонизации заключался в определении содержания ТГМ, а также остаточного хлора в модельных пробах природной воды, подвергшейся лабораторному хлорированию различными дозами хлора с учётом параметров её хлорпоглощаемости (30 парных параллельных проб с преаммонизацией сульфатом аммония и без аммонизации). По результатам эксперимента построены математические модели зависимости концентраций ХФ, ДХБМ и ХДБМ от содержания суммарного остаточного активного хлора. При ретроспективном анализе онкологической заболеваемости в г. Таганроге и Неклиновском районе применены категоризованные сведения о зарегистрированных злокачественных новообразованиях (ЗН) из отчетных форм № 35 и № 7 за 2004–2018 гг.

В работе использовано программное обеспечение собственной разработки, реализующее процедуры формирования баз данных и статистической обработки результатов исследований водопроводной воды, алгоритмы оценки риска для здоровья населения в соответствии с Руководством Р 2.1.10.1920-04 [27] и комплексных исследований эпидемиологического типа [29, 30], а также профессиональный пакет статистических программ IBM SPSS Statistics («Statistical Package for Social Science») version 19.0.

Таблица 1 / Table 1

Частота и структура злокачественных новообразований приоритетных локализаций в городе Таганроге и Неклиновском районе Ростовской области за период 2004–2018 гг.**The frequency and structure of malignant neoplasms of priority localizations in Taganrog and the Neklinovsky district of the Rostov region for the period 2004–2018**

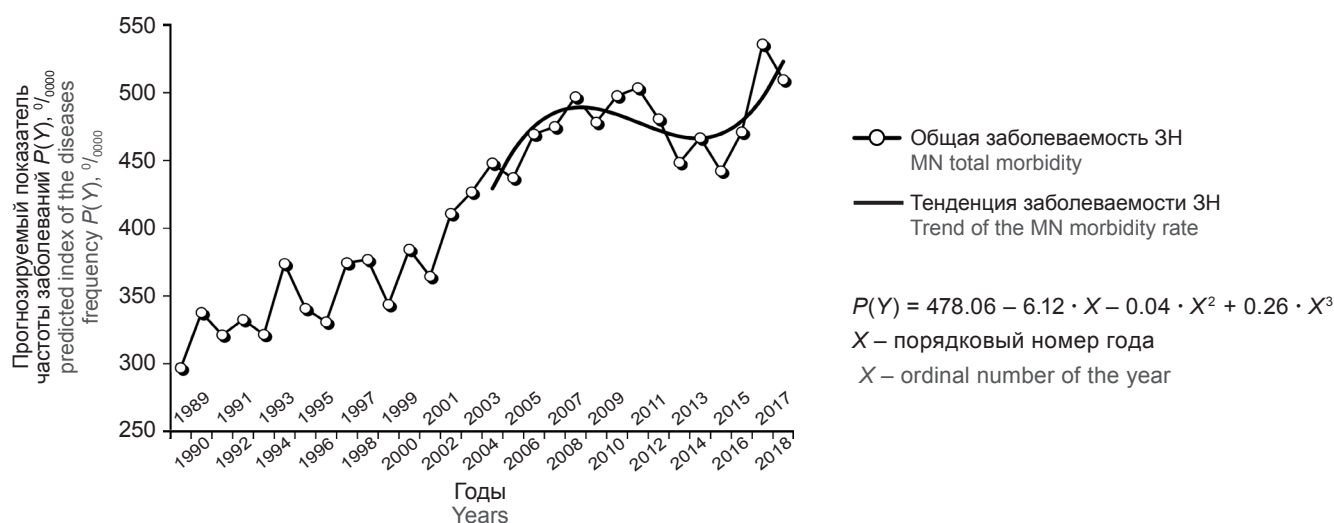
| Локализация злокачественного новообразования (ЗН) Localization of a malignant neoplasm (MN) | Заболеемость на 100 тыс. населения, ‰ Morbidity per 100 thousand population, ‰ | | Удельный вес в сумме ЗН, % Share in the sum of MN, % | | Ранг Rank | | Заболеемость населения Ростовской области, ‰ Morbidity of the population of the Rostov region, ‰ | | Ранг Rank | |
|--|---|--|---|--|----------------------|--|---|--------------------------------------|---|---|
| | Таганрог Taganrog | Неклиновский район Неклиновский район Neklinovsky district | Таганрог Taganrog | Неклиновский район Неклиновский район Neklinovsky district | Таганрог Taganrog | Неклиновский район Неклиновский район Neklinovsky district | в городах in the cities | в сельских районах in rural areas | среди городов области among the cities in the region | среди сельских районов among rural areas of the region |
| Желудок Stomach | 31.06 | 16.90 | 6.55 | 6.86 | 5 | 3 | 21.08 | 19.26 | 1 | 25 |
| Ободочная кишка Colon | 32.52 | 12.46 | 6.80 | 5.05 | 4 | 5 | 25.24 | 16.16 | 1 | 36 |
| Лёгкое Lung | 44.57 | 38.76 | 9.37 | 14.61 | 3 | 1 | 36.53 | 42.89 | 3 | 33 |
| Кожа Skin | 69.45 | 17.00 | 14.55 | 6.44 | 1 | 4 | 57.43 | 39.40 | 4 | 41 |
| Молочная железа Breast | 59.91 | 29.84 | 12.52 | 11.31 | 2 | 2 | 45.67 | 31.79 | 1 | 22 |
| Всего ЗН Total MN | 477.30 | 264.26 | 100.00 | 100.00 | – | – | 373.06 | 309.16 | 1 | 37 |

Результаты

Данное исследование продолжает изучение роли потенциальных факторов риска в возникновении ЗН в г. Таганроге [31, 32]. Актуальность оценки канцерогенного риска, обусловленного ТГМ в водопроводной воде, определяется неблагоприятной ситуацией в городе, где среднегодовая частота ЗН за 2004–2018 гг. составляет $447,30 \pm 15,32$ на 100 тыс. населения (‰), что достоверно ($p < 0,01$) выше заболеваемости городского населения области ($373,06 \pm 9,04$) в 1,28 раза и соответствует первому ранговому месту [33]. К числу приоритетных локализаций ЗН относятся кожа (без

учёта меланомы) с долей 14,6%, молочная железа (12,5%), трахея, бронхи и лёгкое (9,4%), затем следуют ободочная кишка и желудок – 6,8 и 6,6% соответственно. Трендовый анализ показал, что многолетняя динамика общей заболеваемости ЗН за последние 15 лет при выраженной вариабельности годовых показателей характеризуется тенденцией к росту при среднегодовом темпе прироста (СГП), равном +1,42%, с максимумом частоты ЗН за весь период наблюдений в 2017 г. – $535,77‰$ (табл. 1, рис. 1).

В сопредельном с Таганрогом Неклиновском районе ситуация по заболеваемости ЗН относительно благополучная при её среднесногодовом уровне ($264,26 \pm 23,19‰$)

**Рис. 1.** Динамика общей первичной заболеваемости злокачественными новообразованиями населения г. Таганрога за период 1989–2018 гг. и её тенденция за период 2004–2018 гг.**Figure 1.** Trend of the general primary morbidity rate of malignant neoplasms in the population of Taganrog for the period 1989–2018 and its tendency for the period 2004–2018.

достоверно ($p < 0,05$) меньше, чем для сельского населения области в целом ($309,16 \pm 8,01\%$), в 1,17 раза, а среди локализаций ЗН первые три ранговых места занимают трахея, бронхи и лёгкое, молочная железа и желудок с удельным весом соответственно 14,61; 11,31 и 6,86% (см. табл. 1).

Проведена сравнительная оценка канцерогенного риска, обусловленного ТГМ, в воде трёх систем централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения, технология водоподготовки которых предусматривает обеззараживание воды поверхностных источников методом хлорирования. В Таганроге с населением около 250 тыс. человек используется вода поверхностных (реки Дон и Миус) и подземных источников (два грунтовых водозабора). Вся речная вода поступает на донские очистные сооружения, где подвергается двухступенчатой водоподготовке на горизонтальных отстойниках и скорых фильтрах с коагуляцией, преаммонизацией сульфатом аммония и двойным хлорированием хлорной водой в качестве реагента. Из донской насосной очищенная и обеззараженная вода подаётся в северную и восточную части города с населением 132,4 тыс. человек, а также на грунтовую и миусскую насосные, снабжающие западную и центральную части города с населением соответственно 77,4 и 40,4 тыс. человек, где она микшируется с водой грунтовых скважин, не подлежащей систематическому обеззараживанию по микробиологическим показателям. Топографические особенности распределительной сети городского водопровода определяют различную долю подвергшейся хлорированию воды поверхностных источников на выходе из донской, грунтовой и миусской насосных – 100; 75 и 45% соответственно. В с. Покровское (население около 12,5 тыс. человек) вода поверхностного источника (река Миус) использовалась по 2015 г. с водоподготовкой, предусматривающей механическую фильтрацию, коагуляцию и хлорирование гипохлоритом натрия или гипохлоритом кальция без аммонизации. С 2016 г. с. Покровское полностью переведено на водоснабжение из подземных источников без обеззараживания воды методом хлорирования. Приморское сельское поселение (население 5,2 тыс. человек) с 2011 г. обеспечивается водой через ответвление от таганрогского магистрального водовода из реки Дон, поступающей на очистные сооружения, находящиеся на ст. Морская, где до 2016 г. практически отсутствовал производственный контроль, обеззараживание воды проводилось хлорной известью без дозатора, что обуславливало её необоснованное гиперхлорирование; в настоящее время водоподготовка оптимизирована, приобретено дозирующее устройство, применяется механическая фильтрация, обеззараживание гипохлоритом натрия и дополнительно ультрафиолетовым излучением без аммонизации.

В Таганроге при исследовании 240 проб воды за период 2012–2018 гг. зарегистрировано единичное сверхнормативное содержание ХФ (1,43 ПДК) на выходе из грунтовой насосной. На выходе из насосных в с. Покровское и на ст. Морская, где преаммонизация не проводится, содержание ТГМ оказалось достоверно выше. Так, в с. Покровское превышение ПДК по ХФ, ДХБМ и ХДБМ выявлено в 2,08; 6,25 и 6,25% соответственно из 48 исследованных проб воды, а их максимальные концентрации соответствовали 1,63; 4,33 и 2,80 ПДК. Наибольшие частота превышения ПДК и максимальные концентрации ТГМ зарегистрированы на выходе из насосной на ст. Морская по результатам исследования 84 проб: ХФ – в 7,14% до 10,74 ПДК, ДХБМ – в 10,71% до 81,67 ПДК и ХДБМ – в 10,71% до 40,33 ПДК (табл. 2).

В соответствии с рекомендациями [25, 26] оценка канцерогенного риска выполнена с учётом обоснованных максимальных экспозиций, рассчитанных на основе верхних 95%-ных доверительных границ средних концентраций ТГМ за 2012–2018 гг.

На этапе характеристики риска для отдельных путей поступления ТГМ установлено, что в Таганроге, где проводит-

ся преаммонизация, суммарный индивидуальный канцерогенный риск за счёт перорального пути поступления ТГМ с водопроводной водой (CRwo) соответствует предельно допустимому уровню ($7,13 \cdot 10^{-6}$), а в его структуре наиболее значимы ХДБМ ($3,87 \cdot 10^{-6}$) и ДХБМ ($2,52 \cdot 10^{-6}$) с долевым участием 54,3 и 35,4% соответственно. При этом CRwo за счёт ХФ ($7,35 \cdot 10^{-7}$) при вкладе 10,3% оказался пренебрежимо мал (уровень *De minimis*). Существенно выше, в 51,22 и 10,2 раза, величина CRwo при отсутствии аммонизации – на выходе из насосной ст. Морская CRwo ($3,65 \cdot 10^{-4}$) она соответствует среднему, приемлемому только для профессиональных групп уровню при вкладе ДХБМ 53,6%, а в с. Покровское ($7,28 \cdot 10^{-5}$) – предельно допустимому уровню.

При расчёте средних суточных доз ТГМ за счёт ингаляционного поступления из водопроводной воды (LADDwi) применена модель McKone со значениями констант закона Генри (Па · м³/моль), составляющими $3,22 \cdot 10^{-3}$ для ХФ, $3,45 \cdot 10^{-4}$ для ХДБМ и $1,05 \cdot 10^{-3}$ для ДХБМ. Установлено, что в суммарном индивидуальном канцерогенном риске за счёт ингаляционного поступления (CRwi) приоритетным ТГМ является ДХБМ с долей от 53,9% в Таганроге до 82,6% на ст. Морская. На выходе из насосных в Таганроге и в с. Покровское величины CRwi соответствуют предельно допустимым уровням ($2,14 \cdot 10^{-6}$ и $1,93 \cdot 10^{-5}$), на ст. Морская – среднему, приемлемому только для профессиональных групп, уровню ($1,08 \cdot 10^{-4}$) при их соотношении 1,00:9,02:50,72.

При оценке индивидуального канцерогенного риска за счёт кожного пути поступления значения факторов наклона (SFd) для всех изучаемых ТГМ приравнены к факторам наклона при пероральном пути поступления (SFo), так как величины их коэффициентов абсорбции в желудочно-кишечном тракте (GIABS) равны 1. Для водопроводной воды в г. Таганроге определён пренебрежимо малый уровень индивидуального канцерогенного риска за счёт кожной экспозиции ТГМ (CRwd), на выходе из насосных в с. Покровское и на ст. Морская – предельно допустимый при соответствующих показателях $6,64 \cdot 10^{-7}$, $6,65 \cdot 10^{-6}$ и $3,33 \cdot 10^{-5}$ с их соотношением 1,00:10,02:50,25.

Таким образом, в Приморском сельском поселении уровень общего индивидуального многомаршрутного канцерогенного риска (TCRw), обусловленного ТГМ в водопроводной воде, по данным за 2012–2018 гг. ($5,07 \cdot 10^{-4}$), неприемлем для населения в целом, что является показанием для разработки и реализации плановых оптимизационных мероприятий. Для населения г. Таганрога и с. Покровское, где значения TCRw, равные $9,93 \cdot 10^{-6}$ и $9,87 \cdot 10^{-5}$, ниже, чем в Приморском сельском поселении, соответственно в 51,04 и 9,94 раза, диагностированы его предельно допустимые уровни. В структуре TCRw превалирует доля перорального пути воздействия (71,8–73,7%), на втором ранговом месте находится ингаляционный путь (19,5–21,5%), на третьем – кожный (6,6–6,7%). При этом из числа изучаемых ТГМ основной долевой вклад в величину TCRw в Таганроге и с. Покровское вносит ХДБМ (45,4 и 47,4% соответственно), а в Приморском сельском поселении – ДХБМ при его удельном весе 59,9%.

Величина общего пожизненного популяционного многомаршрутного канцерогенного риска (TPCRw), соответствующая дополнительному по отношению к фоновому числу случаев ЗН, которые могут возникнуть на протяжении средней продолжительности жизни (70 лет) вследствие реализации перорального, ингаляционного и кожного воздействия содержащихся в водопроводной воде ХФ, ДХБМ и ХДБМ, по данным за семилетний период наблюдения, составляет для Таганрога, с. Покровское и Приморского сельского поселения соответственно 2,486; 1,221 и 2,663 (табл. 3).

Анализ динамики общего годового популяционного многомаршрутного канцерогенного риска (TPCRAW) показал, что в г. Таганроге за 2012–2018 гг. сформировалась благоприятная тенденция к его снижению при СгТП –35,23%. В с. Покровское за 2012–2015 гг. в отношении TPCRAW

Таблица 2 / Table 2

Результаты исследований водопроводной воды на содержание тригалогенметанов в г. Таганроге и Неклиновском районе Ростовской области за период 2012–2018 гг.

Results of studies of tap water for the content of trihalomethanes in Taganrog and the of the Rostov region for the period 2012–2018

| Показатель Indicator | Таганрог Taganrog | | | Неклиновский район Neklinovsky district | | |
|---|---|---|---------------------|--|---|--|
| | всего на выходе из насосных станций all at the outlet of the pumping stations | в том числе насосные станции including the pumping station | | | насосная ст. Покровское Pokrovskoe pumping station | насосная ст. Морская Marine pumping station |
| | | донская donskaya | грунтовая ground | миусская miusskaya | | |
| <i>Хлороформ (CAS 67-66-3) Chloroform (CAS 67-66-3)</i> | | | | | | |
| Доля проб с превышением ПДК, % The proportion of samples exceeding the MPC, % | 0.42 | 0 | 1.39 | 0 | 2.08 | 7.14 |
| Средняя концентрация, ПДК Average concentration, MPC | 0.056 | 0.061 | 0.064 | 0.045 | 0.192 | 0.423 |
| Верхняя 95%-доверительная граница средней концентрации, ПДК Upper 95 th % confidence limit of mean concentration, MPC | 0.073 | 0.088 | 0.108 | 0.062 | 0.272 | 0.693 |
| Максимальная концентрация, ПДК Maximum concentration, MPC | 1.433 | 0.733 | 1.433 | 0.500 | 1.633 | 10.733 |
| <i>Хлордибромметан (CAS 124-48-1) Chlordibromomethane (CAS 124-48-1)</i> | | | | | | |
| Доля проб с превышением ПДК, % The proportion of samples exceeding the MPC, % | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.25 | 10.71 |
| Средняя концентрация, ПДК Average concentration, MPC | 0.042 | 0.036 | 0.056 | 0.036 | 0.389 | 1.245 |
| Верхняя 95%-доверительная граница средней концентрации, ПДК Upper 95 th % confidence limit of mean concentration, MPC | 0.056 | 0.056 | 0.090 | 0.056 | 0.581 | 2.352 |
| Максимальная концентрация, ПДК Maximum concentration, MPC | 0.840 | 0.537 | 0.840 | 0.567 | 2.800 | 40.333 |
| <i>Дихлорбромметан (CAS 75-27-4) Dichlorobromomethane (CAS 75-27-4)</i> | | | | | | |
| Доля проб с превышением ПДК, % The proportion of samples exceeding the MPC, % | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.25 | 10.71 |
| Средняя концентрация, ПДК Average concentration, MPC | 0.038 | 0.034 | 0.044 | 0.036 | 0.353 | 1.805 |
| Верхняя 95%-доверительная граница средней концентрации, ПДК Upper 95 th % confidence limit of mean concentration, MPC | 0.050 | 0.053 | 0.071 | 0.053 | 0.587 | 3.845 |
| Максимальная концентрация, ПДК Maximum concentration, MPC | 0.577 | 0.467 | 0.577 | 0.367 | 4.333 | 81.667 |

диагностирована тенденция к росту со СгТП +77,74%. В Приморском сельском поселении при общей тенденции ТРСРАw к снижению со СгТП –35,23% отмечались его крайне высокие уровни из-за грубых нарушений технологии водоподготовки. Так, в 2015 г. доля проб водопроводной воды

со сверхнормативным содержанием ХФ, ДХБМ и ХДБМ на выходе из насосной ст. Морская составляла 75; 50 и 50% при их максимальных концентрациях 2,33; 81,67 и 40,33 ПДК, а величина ТCRw, равная $3,234 \cdot 10^{-3}$, соответствует уровню *De manifestis Risk*, неприемлемому ни для населения, ни для

Таблица 3 / Table 3

Оценка индивидуального и популяционного канцерогенного риска (КР), обусловленного тригалогенметанами в водопроводной воде, по данным за период 2012–2018 гг.

Assessment of individual and population carcinogenic risk (CR) caused by trihalomethanes in tap water, based on data for the period 2012–2018

| Показатель Indices names | Единица измерения Units | Таганрог Taganrog | | | | | Неклиновский район Neklinovsky district | |
|---|---|--|---|-----------------------|-----------------------|---|--|-----------------------|
| | | всего на выходе из насосных all at the outlet of the pumping stations | в том числе насосные станции including the pumping station | | | насосная ст. Покровское Pokrovskoe pumping station | насосная ст. Морская Marine pumping station | |
| | | | Донская Donskaya | грунтовая ground | Миусская Miuskaya | | | |
| <i>Канцерогенный риск при пероральном поступлении тригалогенметанов, содержащихся в водопроводной воде</i> The carcinogenic risk from oral ingestion of trihalomethanes in tap water | | | | | | | | |
| Индивидуальный КР, CRwo Individual CR, CRwo | Хлороформ Chloroform [1] | CRwo1 | $7.348 \cdot 10^{-7}$ | $8.871 \cdot 10^{-7}$ | $1.084 \cdot 10^{-6}$ | $6.214 \cdot 10^{-7}$ | $2.724 \cdot 10^{-6}$ | $6.948 \cdot 10^{-6}$ |
| | | % | 10.30 | 11.85 | 9.91 | 8.65 | 3.74 | 1.90 |
| | Хлордибромметан Chlorodibromomethane [2] | CRwo2 | $3.874 \cdot 10^{-6}$ | $3.896 \cdot 10^{-6}$ | $6.226 \cdot 10^{-6}$ | $3.879 \cdot 10^{-6}$ | $4.013 \cdot 10^{-5}$ | $1.624 \cdot 10^{-4}$ |
| | | % | 54.32 | 52.04 | 56.90 | 53.98 | 55.15 | 44.46 |
| | Дихлорбромметан Dichlorobromomethane [3] | CRwo3 | $2.523 \cdot 10^{-6}$ | $2.703 \cdot 10^{-6}$ | $3.633 \cdot 10^{-6}$ | $2.686 \cdot 10^{-6}$ | $2.992 \cdot 10^{-5}$ | $1.959 \cdot 10^{-4}$ |
| | | % | 35.38 | 36.11 | 33.20 | 37.37 | 41.11 | 53.64 |
| Пожизненный (PCRwo) и годовой (PCRAwo) популяционные КР Lifetime (PCRwo) and annual (PCRAwo) population CR | Хлороформ Chloroform [1] | PCRwo1 | $1.839 \cdot 10^{-1}$ | $1.175 \cdot 10^{-1}$ | $8.395 \cdot 10^{-2}$ | $2.513 \cdot 10^{-2}$ | $3.369 \cdot 10^{-2}$ | $3.650 \cdot 10^{-2}$ |
| | | PCRAwo1 | $2.627 \cdot 10^{-3}$ | $1.678 \cdot 10^{-3}$ | $1.199 \cdot 10^{-3}$ | $3.590 \cdot 10^{-4}$ | $4.813 \cdot 10^{-4}$ | $5.214 \cdot 10^{-4}$ |
| | Хлордибромметан Chlorodibromomethane [2] | PCRwo2 | $0.965 \cdot 10^{-1}$ | $5.158 \cdot 10^{-1}$ | $4.822 \cdot 10^{-1}$ | $1.569 \cdot 10^{-1}$ | $4.964 \cdot 10^{-1}$ | $8.530 \cdot 10^{-1}$ |
| | | PCRAwo2 | $1.385 \cdot 10^{-2}$ | $7.369 \cdot 10^{-3}$ | $6.888 \cdot 10^{-3}$ | $2.241 \cdot 10^{-3}$ | $7.091 \cdot 10^{-3}$ | $1.219 \cdot 10^{-2}$ |
| | Дихлорбромметан Dichlorobromomethane [3] | PCRwo3 | $6.315 \cdot 10^{-1}$ | $3.579 \cdot 10^{-1}$ | $2.813 \cdot 10^{-1}$ | $1.086 \cdot 10^{-1}$ | $3.700 \cdot 10^{-1}$ | 1.029 |
| | | PCRAwo3 | $9.022 \cdot 10^{-3}$ | $5.112 \cdot 10^{-3}$ | $4.019 \cdot 10^{-3}$ | $1.552 \cdot 10^{-3}$ | $5.286 \cdot 10^{-3}$ | $1.470 \cdot 10^{-2}$ |
| <i>Канцерогенный риск при ингаляционном поступлении тригалогенметанов, содержащихся в водопроводной воде</i> The carcinogenic risk from inhalation of trihalomethanes contained in tap water | | | | | | | | |
| Индивидуальный КР (CRwi) Individual CR (CRwi) | Хлороформ Chloroform [1] | CRwi1 | $6.897 \cdot 10^{-7}$ | $8.326 \cdot 10^{-7}$ | $1.018 \cdot 10^{-6}$ | $5.832 \cdot 10^{-7}$ | $2.556 \cdot 10^{-6}$ | $6.522 \cdot 10^{-6}$ |
| | | % | 32.27 | 35.22 | 32.29 | 27.69 | 13.26 | 6.02 |
| | Хлордибромметан Chlorodibromomethane [2] | CRwi2 | $2.946 \cdot 10^{-7}$ | $2.963 \cdot 10^{-7}$ | $4.735 \cdot 10^{-7}$ | $2.950 \cdot 10^{-7}$ | $3.052 \cdot 10^{-6}$ | $1.235 \cdot 10^{-5}$ |
| | | % | 13.78 | 12.53 | 15.02 | 14.01 | 15.83 | 11.39 |
| | Дихлорбромметан Dichlorobromomethane [3] | CRwi3 | $1.153 \cdot 10^{-6}$ | $1.235 \cdot 10^{-6}$ | $1.660 \cdot 10^{-6}$ | $1.228 \cdot 10^{-6}$ | $1.367 \cdot 10^{-5}$ | $8.955 \cdot 10^{-5}$ |
| | | % | 53.95 | 52.25 | 52.69 | 58.30 | 70.91 | 82.59 |
| Пожизненный (PCRwi) и годовой (PCRAwi) популяционные КР Lifetime (PCRwi) and annual (PCRAwi) population CR | Хлороформ Chloroform [1] | PCRwi1 | $1.726 \cdot 10^{-1}$ | $1.102 \cdot 10^{-1}$ | $7.880 \cdot 10^{-2}$ | $2.359 \cdot 10^{-2}$ | $3.162 \cdot 10^{-2}$ | $3.426 \cdot 10^{-2}$ |
| | | PCRAwi1 | $2.466 \cdot 10^{-3}$ | $1.575 \cdot 10^{-3}$ | $1.126 \cdot 10^{-3}$ | $3.370 \cdot 10^{-4}$ | $4.517 \cdot 10^{-4}$ | $4.894 \cdot 10^{-4}$ |
| | Хлордибромметан Chlorodibromomethane [2] | PCRwi2 | $7.372 \cdot 10^{-2}$ | $3.923 \cdot 10^{-2}$ | $3.667 \cdot 10^{-2}$ | $1.193 \cdot 10^{-2}$ | $3.775 \cdot 10^{-2}$ | $6.487 \cdot 10^{-2}$ |
| | | PCRAwi2 | $1.053 \cdot 10^{-3}$ | $5.604 \cdot 10^{-4}$ | $5.238 \cdot 10^{-4}$ | $1.705 \cdot 10^{-4}$ | $5.393 \cdot 10^{-4}$ | $9.267 \cdot 10^{-4}$ |
| | Дихлорбромметан Dichlorobromomethane [3] | PCRwi3 | $2.887 \cdot 10^{-1}$ | $1.636 \cdot 10^{-1}$ | $1.286 \cdot 10^{-1}$ | $4.966 \cdot 10^{-2}$ | $1.691 \cdot 10^{-1}$ | $4.704 \cdot 10^{-1}$ |
| | | PCRAwi3 | $4.124 \cdot 10^{-3}$ | $2.337 \cdot 10^{-3}$ | $1.837 \cdot 10^{-3}$ | $7.094 \cdot 10^{-4}$ | $2.416 \cdot 10^{-3}$ | $6.720 \cdot 10^{-3}$ |
| <i>Канцерогенный риск за счёт кожной экспозиции тригалогенметанов, содержащихся в водопроводной воде</i> Carcinogenic risk due to cutaneous exposure to trihalomethanes in tap water | | | | | | | | |
| Индивидуальный КР, CRwd Individual CR, CRwo | Хлороформ Chloroform [1] | CRwd1 | $8.635 \cdot 10^{-8}$ | $1.042 \cdot 10^{-7}$ | $1.274 \cdot 10^{-7}$ | $7.302 \cdot 10^{-8}$ | $3.201 \cdot 10^{-7}$ | $8.165 \cdot 10^{-7}$ |
| | | % | 13.01 | 14.89 | 12.54 | 10.97 | 4.81 | 2.45 |
| | Хлордибромметан Chlorodibromomethane [2] | CRwd2 | $3.440 \cdot 10^{-7}$ | $3.460 \cdot 10^{-7}$ | $5.530 \cdot 10^{-7}$ | $3.445 \cdot 10^{-7}$ | $3.564 \cdot 10^{-6}$ | $1.442 \cdot 10^{-5}$ |
| | | % | 51.85 | 49.43 | 54.42 | 51.75 | 53.61 | 43.25 |
| | Дихлорбромметан Dichlorobromomethane [3] | CRwd3 | $2.332 \cdot 10^{-7}$ | $2.498 \cdot 10^{-7}$ | $3.357 \cdot 10^{-7}$ | $2.482 \cdot 10^{-7}$ | $2.765 \cdot 10^{-6}$ | $1.810 \cdot 10^{-5}$ |
| | | % | 35.38 | 35.59 | 32.86 | 38.24 | 38.88 | 51.10 |

Окончание таблицы на стр. 105 / End of the table on page 105

Окончание таблицы 3. Начало на стр. 104 / End of table 3. Start on page 104

| Показатель Indices names | Единица измерения Units | Таганрог Taganrog | | | | | Неклиновский район Neklinovsky district | |
|---|---|--|---|-----------------------|-----------------------|---|--|-----------------------|
| | | всего на выходе из насосных станций all at the outlet of the pumping stations | в том числе насосные станции including the pumping station | | | насосная ст. Покровское Pokrovskoe pumping station | насосная ст. Морская Marine pumping station | |
| | | | Донская Donskaya | грунтовая ground | Миусская Miuskaya | | | |
| <i>Канцерогенный риск за счёт кожной экспозиции тригалогенметанов, содержащихся в водопроводной воде</i> <i>Carcinogenic risk due to cutaneous exposure to trihalomethanes in tap water</i> | | | | | | | | |
| Пожизненный (PCRwd) и годовой (PCRAwd) популяционные КР | Хлороформ Chloroform [1] | PCRwd1 | $2.161 \cdot 10^{-2}$ | $1.380 \cdot 10^{-2}$ | $9.865 \cdot 10^{-3}$ | $2.953 \cdot 10^{-3}$ | $3.959 \cdot 10^{-3}$ | $4.289 \cdot 10^{-3}$ |
| | | PCRAwd1 | $3.087 \cdot 10^{-4}$ | $1.972 \cdot 10^{-4}$ | $1.409 \cdot 10^{-4}$ | $4.219 \cdot 10^{-5}$ | $5.656 \cdot 10^{-5}$ | $6.127 \cdot 10^{-5}$ |
| Lifetime (PCRwo) and annual (PCRAwo) population CR | Хлордибромметан Chlorodibromomethane [2] | PCRwd2 | $8.610 \cdot 10^{-2}$ | $4.581 \cdot 10^{-2}$ | $4.282 \cdot 10^{-2}$ | $1.394 \cdot 10^{-2}$ | $4.409 \cdot 10^{-2}$ | $7.576 \cdot 10^{-2}$ |
| | | PCRAwd2 | $1.230 \cdot 10^{-3}$ | $6.545 \cdot 10^{-4}$ | $6.118 \cdot 10^{-4}$ | $1.991 \cdot 10^{-4}$ | $6.298 \cdot 10^{-4}$ | $1.082 \cdot 10^{-3}$ |
| | Дихлорбромметан Dichlorobromomethane [3] | PCRwd3 | $5.836 \cdot 10^{-2}$ | $3.307 \cdot 10^{-2}$ | $2.600 \cdot 10^{-2}$ | $1.004 \cdot 10^{-2}$ | $3.420 \cdot 10^{-2}$ | $9.511 \cdot 10^{-2}$ |
| | | PCRAwd3 | $8.337 \cdot 10^{-4}$ | $4.725 \cdot 10^{-4}$ | $3.714 \cdot 10^{-4}$ | $1.434 \cdot 10^{-4}$ | $4.885 \cdot 10^{-4}$ | $1.359 \cdot 10^{-3}$ |
| <i>Комплексные и суммарные индивидуальные канцерогенные риски, обусловленные тригалогенметанами в водопроводной воде</i> <i>Complex and total individual carcinogenic risks caused by trihalomethanes in tap water</i> | | | | | | | | |
| Комплексный индивидуальный КР при одновременном поступлении различными путями Complex individual CR at simultaneous admission in different ways | Хлороформ Chloroform [1] | CRw1 | $1.511 \cdot 10^{-6}$ | $1.824 \cdot 10^{-6}$ | $2.229 \cdot 10^{-6}$ | $1.278 \cdot 10^{-7}$ | $5.600 \cdot 10^{-6}$ | $1.429 \cdot 10^{-5}$ |
| | | % | 15.21 | 17.29 | 14.75 | 12.83 | 5.67 | 2,82 |
| | Хлордибромметан Chlorodibromomethane [2] | CRw2 | $4.512 \cdot 10^{-6}$ | $4.538 \cdot 10^{-6}$ | $7.253 \cdot 10^{-6}$ | $4.519 \cdot 10^{-6}$ | $4.675 \cdot 10^{-5}$ | $1.892 \cdot 10^{-4}$ |
| | | % | 45.43 | 43.02 | 48.00 | 45.38 | 47.36 | 37,31 |
| | Дихлорбромметан Dichlorobromomethane [3] | CRw3 | $3.910 \cdot 10^{-6}$ | $4.188 \cdot 10^{-6}$ | $5.629 \cdot 10^{-6}$ | $4.162 \cdot 10^{-6}$ | $4.635 \cdot 10^{-5}$ | $3.036 \cdot 10^{-4}$ |
| | | % | 39.36 | 39.70 | 37.25 | 41.79 | 46.96 | 59,87 |
| Суммарный индивидуальный КР по отдельным путям поступления Cumulative individual CR by individual routes of receipt | Пероральный путь oral route [o] | CRwo | $7.132 \cdot 10^{-6}$ | $7.486 \cdot 10^{-6}$ | $1.094 \cdot 10^{-5}$ | $7.187 \cdot 10^{-6}$ | $7.277 \cdot 10^{-5}$ | $3.652 \cdot 10^{-4}$ |
| | | % | 71.80 | 70.95 | 72.42 | 72.17 | 73.73 | 72,04 |
| | Ингаляционный путь inhalation route [i] | CRwi | $2.138 \cdot 10^{-6}$ | $2.364 \cdot 10^{-6}$ | $3.151 \cdot 10^{-6}$ | $2.106 \cdot 10^{-6}$ | $1.928 \cdot 10^{-5}$ | $1.084 \cdot 10^{-4}$ |
| | | % | 21.52 | 22.41 | 20.86 | 21.15 | 19.54 | 21,38 |
| | Накожная экспозиция cutaneous exposure [d] | CRwd | $6.635 \cdot 10^{-7}$ | $7.000 \cdot 10^{-7}$ | $1.016 \cdot 10^{-6}$ | $6.658 \cdot 10^{-7}$ | $6.649 \cdot 10^{-6}$ | $3.334 \cdot 10^{-5}$ |
| | | % | 6.68 | 6.64 | 6.72 | 6.69 | 6.74 | 6,58 |
| Общий индивидуальный многомаршрутный КР General individual multi-route CR | | TCRw | $9.933 \cdot 10^{-6}$ | $1.055 \cdot 10^{-5}$ | $1.511 \cdot 10^{-5}$ | $9.958 \cdot 10^{-6}$ | $9.870 \cdot 10^{-5}$ | $5.070 \cdot 10^{-4}$ |
| | | % | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| <i>Комплексные и суммарные популяционные канцерогенные риски, обусловленные тригалогенметанами в водопроводной воде</i> <i>Complex and total population carcinogenic risks caused by trihalomethanes in tap water</i> | | | | | | | | |
| Комплексный популяционный КР при одновременном поступлении различными путями Complex population CR in simultaneous intake in various ways | Хлороформ Chloroform [1] | PCRw1 | $3.781 \cdot 10^{-1}$ | $2.415 \cdot 10^{-1}$ | $1.726 \cdot 10^{-1}$ | $5.167 \cdot 10^{-2}$ | $6.92 \cdot 10^{-2}$ | $7.505 \cdot 10^{-2}$ |
| | | % | 15.21 | 17.29 | 14.75 | 12.83 | 5.67 | 2,82 |
| | Хлордибромметан Chlorodibromomethane [2] | PCRw2 | 1.129 | $6.009 \cdot 10^{-1}$ | $5.617 \cdot 10^{-1}$ | $1.828 \cdot 10^{-1}$ | $5.782 \cdot 10^{-1}$ | $9.936 \cdot 10^{-1}$ |
| | | % | 45.43 | 43.02 | 48.00 | 45.38 | 47.36 | 37,31 |
| | Дихлорбромметан Dichlorobromomethane [3] | PCRw3 | $9.786 \cdot 10^{-1}$ | $5.545 \cdot 10^{-1}$ | $4.359 \cdot 10^{-1}$ | $1.683 \cdot 10^{-1}$ | $5.733 \cdot 10^{-1}$ | 1.595 |
| | | % | 39.36 | 39.70 | 37.25 | 41.79 | 46.96 | 59,87 |
| Суммарный популяционный КР по отдельным путям поступления Cumulative population CR on separate routes of penetration | Пероральный путь oral route [o] | PCRwo | 1.785 | $9.912 \cdot 10^{-1}$ | $8.474 \cdot 10^{-1}$ | $2.907 \cdot 10^{-1}$ | $9.001 \cdot 10^{-1}$ | 1.919 |
| | | % | 71.80 | 70.95 | 72.42 | 72.17 | 73.73 | 72,04 |
| | Ингаляционный путь inhalation route [i] | PCRwi | $5.350 \cdot 10^{-1}$ | $3.130 \cdot 10^{-1}$ | $2.440 \cdot 10^{-1}$ | $8.518 \cdot 10^{-2}$ | $2.385 \cdot 10^{-1}$ | $5.695 \cdot 10^{-1}$ |
| | | % | 21.52 | 22.41 | 20.86 | 21.15 | 19.54 | 21,38 |
| | Накожная экспозиция cutaneous exposure [d] | PCRwd | $1.661 \cdot 10^{-1}$ | $9.269 \cdot 10^{-2}$ | $7.869 \cdot 10^{-2}$ | $2.693 \cdot 10^{-2}$ | $8.224 \cdot 10^{-2}$ | $1.752 \cdot 10^{-1}$ |
| | | % | 6.68 | 6.64 | 6.72 | 6.69 | 6.74 | 6,58 |
| Общий пожизненный популяционный многомаршрутный КР General lifetime population-based multi-route CR | | TPCRw | 2.486 | 1.397 | 1.170 | $4.028 \cdot 10^{-1}$ | 1.221 | 2.663 |
| | | % | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

профессиональных групп, что потребовало проведения экстренных оздоровительных мероприятий (табл. 4, рис. 2).

При экспериментальной оценке эффективности аммонизации в целях минимизации обусловленного ТГМ канцерогенного риска параллельные пробы речной воды подвергали лабораторному хлорированию одинаковыми дозами хлора – одна из проб с преаммонизацией сульфатом аммония при его весовом соотношении с дозой хлора 1:3, а вторая без аммонизации. После 30-минутной экспозиции модельных проб в них методом газожидкостной хроматографии определяли концентрации ХФ, ДХБМ и ХДБМ. Также проводили измерение содержания суммарного остаточного активного хлора (СОАХ), варьирующего в зависимости от

исходной дозы хлора. Выявлены сильные прямые статистически значимые корреляционные связи между содержанием ТГМ и СОАХ, наиболее адекватно описываемые нелинейными регрессионными моделями по типу степенной кривой при лабораторном хлорировании с преаммонизацией и логарифмической кривой – при хлорировании без аммонизации (табл. 5).

Построенные нелинейные регрессионные модели свидетельствуют о том, что в зависимости от степени превышения регламентируемого содержания СОАХ (0,8–1,2 мг/л), например, при гиперхлорировании, существенно снижается эффективность преаммонизации в отношении предотвращения образования в воде ТГМ (табл. 6, рис. 3).

Таблица 4 / Table 4

Динамика общего годового популяционного многомаршрутного канцерогенного риска, обусловленного тригалогенметанами в водопроводной воде, за период 2012–2018 гг.

Dynamics of the total annual population multi-route carcinogenic risk caused by trihalomethanes in tap water for the period 2012–2018

| Территория Ростовской области Territory of the Rostov region | Общий годовой популяционный многомаршрутный канцерогенный риск (TPCRAw) Total annual population multi-route carcinogenic risk (TPCRAw) | | | | | | | Среднегодовой темп прироста тенденции, % Average annual growth rate of the trend, % | |
|---|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|
| | Год наблюдения Observation years | | | | | | | | |
| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | | В целом за весь период наблюдения Overall for the entire observation period |
| Таганрог Taganrog | $8.849 \cdot 10^{-2}$ | $1.501 \cdot 10^{-2}$ | $1.159 \cdot 10^{-1}$ | $3.625 \cdot 10^{-2}$ | $6.153 \cdot 10^{-3}$ | $8.900 \cdot 10^{-3}$ | $1.835 \cdot 10^{-2}$ | $3.551 \cdot 10^{-2}$ | –35.23 |
| Неклиновский район Neklinovsky district | | | | | | | | | |
| с. Покровское Pokrovskoe village | $9.948 \cdot 10^{-3}$ | $1.078 \cdot 10^{-2}$ | $3.380 \cdot 10^{-2}$ | $3.823 \cdot 10^{-2}$ | Н/о N.d. | Н/о N.d. | Н/о N.d. | $1.744 \cdot 10^{-2}$ | 77.74 |
| ст. Морская Marine station | $1.915 \cdot 10^{-3}$ | $7.143 \cdot 10^{-3}$ | $4.848 \cdot 10^{-2}$ | $2.427 \cdot 10^{-1}$ | $4.032 \cdot 10^{-3}$ | $2.706 \cdot 10^{-3}$ | $1.442 \cdot 10^{-3}$ | $3.805 \cdot 10^{-2}$ | –4.35 |

Примечание. Н/о – не обнаружено.

Note. N.d. – not detected.

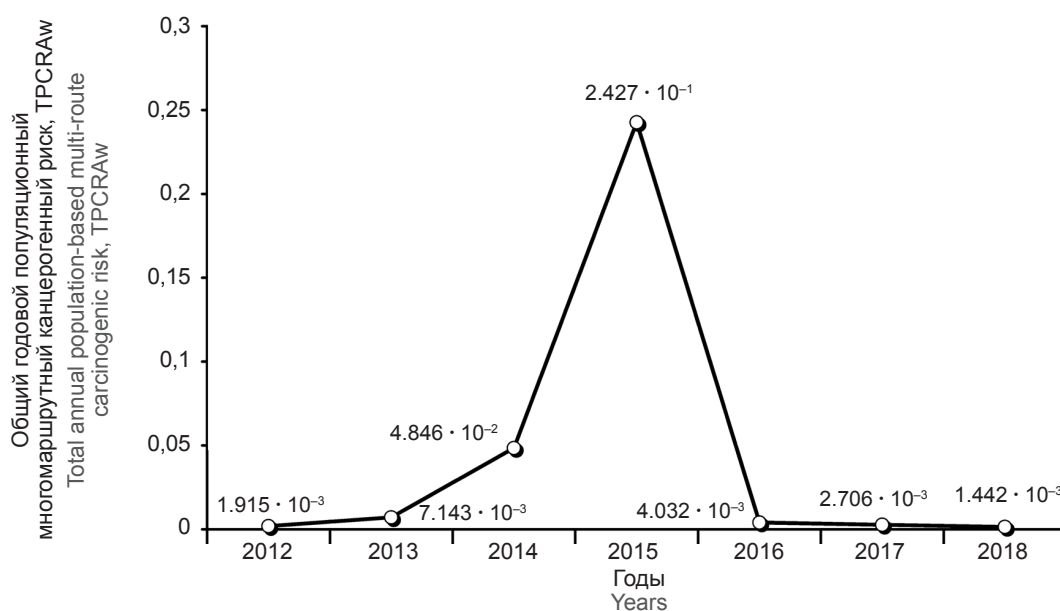


Рис. 2. Динамика общего годового популяционного многомаршрутного канцерогенного риска, обусловленного тригалогенметанами в водопроводной воде Приморского сельского поселения, за 2012–2018 гг.

Fig. 2. Trend of the total annual population multi-route carcinogenic risk caused by trihalomethanes in the tap water of the Primorsky rural settlement for 2012–2018.

Таблица 5 / Table 5

Корреляционные связи между содержанием суммарного остаточного активного хлора и тригалогенметанов в пробах природной воды после лабораторного обеззараживания**Correlation relationships between the content of total residual active chlorine and trihalomethanes in natural water samples after laboratory disinfection**

| Тригалогенметан Trihalomethane name | Условия лабораторного хлорирования модельного раствора Conditions for laboratory chlorination of the model solution | Линейная регрессионная модель Linear regression model | | Нелинейная регрессионная модель Non-linear regression model | | | |
|---|--|--|--------|--|--------|---|---|
| | | rYX | p | rYX | p | тип линии регрессии regression line type | формула линии нелинейной регрессии (модель зависимости концентрации ТГМ от содержания остаточного хлора) nonlinear regression line formula (model of dependence of THM concentration on residual chlorine content) |
| Хлороформ Chloroform | С аммонизацией With ammonization | 0.812 | < 0.01 | 0.863 | < 0.01 | Степенная кривая Power curve | $y = 0.0007 \cdot x^{3-801}$ |
| | Без аммонизации Without ammonization | 0.743 | < 0.05 | 0.811 | < 0.01 | Логарифмическая кривая logarithmic curve | $y = 0.024 + 0.020 \cdot \log(x)$ |
| Хлордибромметан Chlorodibromomethane | С аммонизацией with ammonization | 0.754 | < 0.05 | 0.819 | < 0.01 | Степенная кривая power curve | $y = 0.00002 \cdot x^{7-111}$ |
| | Без аммонизации Without ammonization | 0.853 | < 0.01 | 0.891 | < 0.01 | Логарифмическая кривая logarithmic curve | $y = 0.035 + 0.042 \cdot \log(x)$ |
| Дихлорбромметан Dichlorobromomethane | С аммонизацией With ammonization | 0.795 | < 0.05 | 0.834 | < 0.01 | Степенная кривая power curve | $y = 0.00053 \cdot x^{3-948}$ |
| | Без аммонизации Without ammonization | 0.813 | < 0.01 | 0.873 | < 0.01 | Логарифмическая кривая logarithmic curve | $y = 0.028 + 0.024 \cdot \log(x)$ |

Примечание. p – статистическая значимость; rYX – коэффициент корреляции.

Note. p – statistical significance; rYX – correlation coefficient.

Таблица 6 / Table 6

Модели зависимостей между содержанием суммарного остаточного активного хлора (мг/дм³) и тригалогенметанов (мг/дм³) в модельных пробах воды после лабораторного обеззараживания**Models of dependencies between the content of total residual active chlorine (mg/dm³) and trihalomethanes (mg/dm³) in model water samples after laboratory disinfection**

| Суммарный остаточный активный хлор Total residual active chlorine | Хлороформ Chloroform | | | Хлордибромметан Chlorodibromomethane | | | Дихлорбромметан Dichlorobromomethane | | |
|--|-------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | с аммонизацией With ammonization | без аммонизации Without ammonization | кратность различия multiplicity of the difference ± | с аммонизацией With ammonization | без аммонизации Without ammonization | кратность различия multiplicity of the difference ± | с аммонизацией With ammonization | без аммонизации Without ammonization | кратность различия multiplicity of the difference ± |
| 0.75 | 0.0002469223 | 0.0210870802 | 85.40 | 0.0001692551 | 0.0253249848 | 149.63 | 0.0000031031 | 0.0295516755 | 9523.16 |
| 1.00 | 0.0007370000 | 0.0235450000 | 31.95 | 0.0005270000 | 0.0283530000 | 53.80 | 0.0000240000 | 0.0347530000 | 1448.04 |
| 1.25 | 0.0017212112 | 0.0254515107 | 14.79 | 0.0012718022 | 0.0307017111 | 24.14 | 0.0001173048 | 0.0387874608 | 330.66 |
| 1.50 | 0.0034420064 | 0.0270092433 | 7.85 | 0.0026123651 | 0.0326207478 | 12.49 | 0.0004288991 | 0.0420838552 | 98.12 |
| 1.75 | 0.0061842141 | 0.0283262875 | 4.58 | 0.0048011524 | 0.0342432701 | 7.13 | 0.0012835068 | 0.0448709170 | 34.96 |
| 2.00 | 0.0102735118 | 0.0294671631 | 2.87 | 0.0081339711 | 0.0356487630 | 4.38 | 0.0033171522 | 0.0472851797 | 14.25 |
| 2.25 | 0.0160751803 | 0.0304734867 | 1.90 | 0.0129496232 | 0.0368884955 | 2.85 | 0.0076647690 | 0.0494147104 | 6.45 |
| 2.50 | 0.0239930584 | 0.0313736738 | 1.31 | 0.0196296065 | 0.0379974741 | 1.94 | 0.0162132442 | 0.0513196405 | 3.17 |

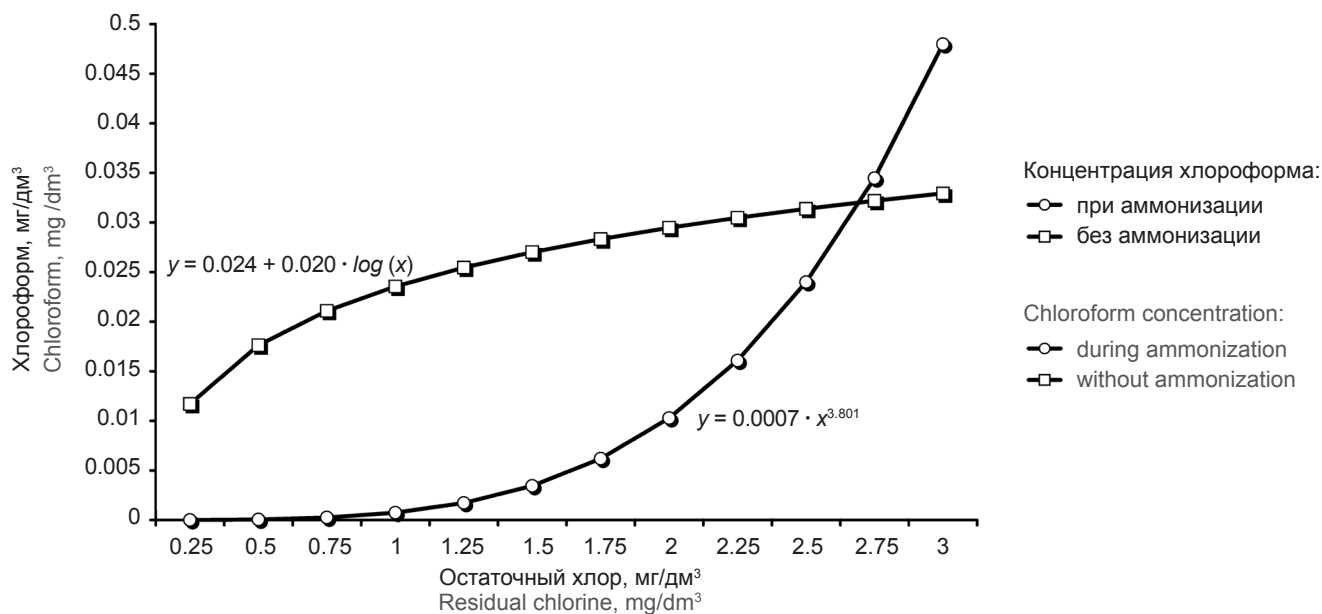


Рис. 3. Регрессионные модели зависимости концентрации хлороформа от содержания суммарного остаточного активного хлора в условиях лабораторного обеззараживания проб природной воды.

Fig. 3. Regression models of the dependence of the concentration of chloroform on the content of the total residual active chlorine in the conditions of laboratory disinfection of natural water samples.

Обсуждение

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о различиях в уровнях потенциального канцерогенного риска, обусловленных особенностями применяемых технологий водоподготовки. Так, за счёт применения в Таганроге комбинированного метода обеззараживания — хлорирования с преаммонизацией, хлор реагирует не с органическими соединениями, присутствующими в воде поверхностных источников (реки Дон и Миус), а с сульфатом аммония с образованием хлораминов, что препятствует образованию ТГМ. Рассчитанный общий индивидуальный многомаршрутный канцерогенный риск (TCRw) для населения города за счёт ХФ, ДХБМ и ХДБМ ($9,933 \cdot 10^{-6}$) соответствует предельно допустимому уровню, что является показанием для постоянного контроля содержания ТГМ в водопроводной воде при ведении СГМ, а общий пожизненный популяционный многомаршрутный канцерогенный риск (TPCRw) составляет 2,49 на 250,3 тыс. жителей. В с. Покровское, где аммонизация в период использования воды поверхностного источника (река Миус) на очистных сооружениях не практиковалась, величина TCRw ($9,870 \cdot 10^{-5}$) выше аналогичного показателя по Таганрогу в 9,94 раза, но также не превышает верхней границы приемлемого риска ($1 \cdot 10^{-4}$), а TPCRw равен 1,22 при населении 12,5 тыс. человек. Наиболее неблагоприятная ситуация диагностирована в Приморском сельском поселении, где при отсутствии аммонизации и систематическом необоснованном гиперхлорировании на очистных сооружениях ст. Морская значение TCRw ($5,07 \cdot 10^{-4}$) превышает показатель по городу в 51,04 раза, что рассматривается как приемлемый только для профессиональных групп населения средний уровень риска, требующий разработки и реализации плановых оптимизационных мероприятий. При этом TPCRw соответствует 2,66 на 250,3 тыс. жителей, а в 2015 г. величина TCRw достигла $3,234 \cdot 10^{-3}$ — уровня *De manifestis Risk*, неприемлемого ни для населения, ни для профессиональных групп, что потребовало проведения экстренных оздоровительных мероприятий.

Построенные на основе результатов эксперимента по лабораторному хлорированию речной воды регрессионные модели корреляционных связей между концентрациями СОАХ и

ТГМ свидетельствуют о том, что высокая эффективность преаммонизации в отношении предотвращения образования ХФ, ДХБМ и ХДБМ в водопроводной воде обеспечивается при таких режимах обеззараживания, когда содержание СОАХ не превышает регламентируемых значений (0,8–1,2 мг/л). При преаммонизации вводимый в воду хлор образует хлорамины, окислительный потенциал которых значительно ниже, чем у свободного хлора, что приводит к уменьшению окислительно-восстановительного потенциала системы «природная вода — хлор» и резкому снижению хлоропоглощаемости воды. Существенное снижение эффективности преаммонизации при повышенных дозах вводимого хлора объясняется тем, что в условиях малой хлоропоглощаемости воды наблюдается двойной эффект: во-первых, из-за избытка активного хлора при перехлорировании происходит интенсивное окисление и разложение образовавшегося в результате преаммонизации монохлорамина с выделением свободного активного хлора и, во-вторых, свободный активный хлор взаимодействует с органическими веществами, содержащимися в природной воде, что приводит к увеличению концентрации хлорорганических соединений, в том числе ТГМ.

Заключение

По показателям частоты, структуры и многолетней динамики злокачественных новообразований г. Таганрог относится к территориям Ростовской области с высоким относительным риском онкологической заболеваемости. Результаты выполненной оценки по данным за 2012–2018 гг. потенциального многомаршрутного канцерогенного риска, обусловленного образующимися при обеззараживании водопроводной воды методом хлорирования ТГМ, позволяют характеризовать его как низкий, соответствующий диапазону допустимого уровня (от 10^{-6} до 10^{-4}). Контрастные различия по содержанию ТГМ в водопроводной воде между используемыми поверхностные источники системами централизованного водоснабжения в г. Таганроге и двух сельских поселениях сопредельного Неклиновского района подтверждают высокую эффективность для минимизации потенциального канцерогенного риска применения в технологии водоподготовки преаммонизации природной воды. При этом к числу

приоритетных факторов образования сверхнормативного количества хлорорганических соединений в водопроводной воде, включая тТГМ, относятся нарушения в технологии обеззараживания воды, в том числе её необоснованное гиперхлорирование.

К перспективным мероприятиям, направленным на снижение канцерогенного риска от ТГМ, наряду с систематическим мониторингом их содержания, применением

преаммонизации и точной дозировкой хлорсодержащих реагентов относятся такие, как глубокая очистка исходной воды до хлорирования с целью уменьшения содержания органических соединений — предшественников ТГМ, применение постхлорирования в конце технологической схемы водоподготовки с заменой первичного хлорирования на безреагентный метод обеззараживания водопроводной воды ультрафиолетовым излучением и др.

Литература

(п.п. 15–20 см. References)

1. Рахманин Ю.А., Доронина О.Д. Стратегические подходы управления рисками для снижения уязвимости человека вследствие изменения водного фактора. *Гигиена и санитария*. 2010; 89(2): 8–13.
2. Рахманин Ю.А., Мельцер А.В., Киселев А.В., Ерастова Н.В. Гигиеническое обоснование управленческих решений с использованием интегральной оценки питьевой воды по показателям химической безвредности и эпидемиологической безопасности. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(4): 302–5. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-4-302-305>
3. Тулакин А.В., Цыплакова Г.В., Амплеева Г.П., Козырева О.Н., Пивнева О.С., Трухина Г.М. Региональные проблемы обеспечения гигиенической надёжности питьевого водопользования. *Гигиена и санитария*. 2016; 95(11): 1025–8. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-11-1025-1028>
4. Журавлев П.В., Аleshnya В.В., Шелякина Т.В., Головина С.В. Влияние условий водопользования на онкозаболеваемость населения. *Гигиена и санитария*. 2000; 79(6): 28–30.
5. Зайцева Н.В., Сбоев А.С., Клейн С.В., Веквшинина С.А. Качество питьевой воды: факторы риска для здоровья населения и эффективность контрольно-надзорной деятельности Роспотребнадзора. *Анализ риска здоровью*. 2019; (2): 44–57. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2019.2.05>
6. 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. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.3.05>
7. Мифтахова К.Р., Пьянкова О.Г., Рудакова Л.В., Глушанкова И.С. Хлорирование как основной метод обеззараживания питьевой воды. *Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика*. 2015; (1): 233–42.
8. Егорова Н.А., Букшук А.А., Красовский Г.Н. Гигиеническая оценка продуктов хлорирования питьевой воды с учетом множественности путей поступления в организм. *Гигиена и санитария*. 2013; 92(2): 18–24.
9. Сбоев А.С., Романенко К.В. Анализ влияния хлорорганических соединений, содержащихся в воде сети хозяйственно-питьевого водоснабжения, на здоровье населения в городах Пермского края. *Гигиена и санитария*. 2016; 95(1): 14–7. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-1-14-17>
10. Ушакова Т.И., Ревич Б.А., Аксель Е.М., Левшин В.Ф. Стойкие хлорорганические соединения как фактор риска развития рака молочной железы. *Вопросы онкологии*. 2002; 48(3): 293–300.
11. Черниченко И.А., Сердюк А.М., Литовченко О.Н., Баленко Н.В. Канцерогенная опасность хлороформа и других побочных продуктов хлорирования питьевой воды. *Гигиена и санитария*. 2009; 88(3): 28–32.
12. Вожаева М.Ю., Холова А.Р., Вагнер Е.В., Кантор Е.А., Кантор Л.И., Труханова Н.В. и соавт. Оценка качества питьевой воды по результатам расширенных мониторинговых исследований и её химической безвредности. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(2): 117–24. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-2-117-124>
13. Зайцева Н.В., Май И.В., Клейн С.В., Селузова Э.В. Опыт установления и доказывания вреда здоровью населения вследствие потребления питьевой воды, содержащей продукты гиперхлорирования. *Здоровье населения и среда обитания*. 2015; (12): 16–8.
14. Красовский Г.Н., Егорова Н.А. Хлорирование воды как фактор повышенной опасности для здоровья населения. *Гигиена и санитария*. 2003; 82(1): 17–21.
21. Авалиани С.Л., Новиков С.М., Шашина Т.А., Додина Н.С., Кислицин В.А., Мишина А.Л. Проблемы совершенствования системы управления качеством окружающей среды на основе анализа риска здоровью населения. *Гигиена и санитария*. 2014; 93(6): 5–8.
22. Беляев Е.Н., Фокин М.В., Новиков С.М., Прусаков В.М., Шашина Т.А., Шаяхметов С.Ф. Актуальные проблемы совершенствования оценки риска здоровью населения для обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия. *Гигиена и санитария*. 2013; 92(5): 53–5.
23. Красовский Г.Н., Рахманин Ю.А., Егорова Н.А. Гигиеническое обоснование оптимизации интегральной оценки питьевой воды по индексу качества воды. *Гигиена и санитария*. 2015; 94(5): 5–10.
24. Новиков С.М., Шашина Т.А., Додина Н.С., Кислицин В.А., Воробьева Л.М., Горяев Д.В. и соавт. Сравнительная оценка канцерогенных рисков здоровью населения при многосредовом воздействии химических веществ. *Гигиена и санитария*. 2015; 94(2): 88–92.
25. Онищенко Г.Г., Новиков С.М., Рахманин Ю.А., Авалиани С.Л., Буштуева К.А. *Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду*. М.: 2002.
26. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: 2004.
27. Калашникова Е.Г., Арутюнова И.Ю., Горина Е.Н., Калашникова О.Б., Малышев Б.В. Снижение содержания хлорорганических соединений в питьевой воде. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2005; (10–1): 11–7.
28. Юхно А.И., Плугоутаренко Н.К. Анализ образования хлорпроизводных соединений в питьевой воде. *Технологии техносферной безопасности*. 2018; (3): 28–35. <https://doi.org/10.25257/TTS.2018.3.79.28-35>
29. Сепетлиев Д.А. *Статистические методы в научных медицинских исследованиях*. М.: Медицина; 1968.
30. Марченко Б.И. *Здоровье на популяционном уровне: статистические методы исследования*. Таганрог: Сфинкс; 1997.
31. Айдинов Г.Т., Марченко Б.И., Софьяникова Л.В., Синельникова Ю.А. Применение многомерных статистических методов при выполнении задач совершенствования информационно-аналитического обеспечения системы социально-гигиенического мониторинга. *Здоровье населения и среда обитания*. 2015; (7): 4–8.
32. Айдинов Г.Т., Марченко Б.И., Синельникова Ю.А. Многомерный анализ структуры и долевого вклада потенциальных факторов риска при злокачественных новообразованиях трахеи, бронхов и легкого. *Анализ риска здоровью*. 2017; (1): 47–55. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2017.1.06>
33. Айдинов Г.Т., Марченко Б.И., Ковалев Е.В. Современные эпидемиологические особенности онкологической заболеваемости населения Ростовской области. *Здоровье населения и среда обитания*. 2017; (11): 7–15. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2017-296-11-7-15>

References

1. Rakhmanin Yu.A., Doronina O.D. Strategic approaches to risk management to reduce human vulnerability due to water factor changes. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2010; 89(2): 8–13. (in Russian)
2. Rakhmanin Yu.A., Mel'tser A.V., Kiselev A.V., Erastova N.V. Hygienic substantiation of management decisions with the use of the integral assessment of drinking water on indices of chemical harmlessness and epidemiological safety. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2017; 96(4): 302–5. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-4-302-305> (in Russian)
3. Tulakin A.V., Tsyplakova G.V., Ampleeva G.P., Kozyreva O.N., Pivneva O.S., Trukhina G.M. Regional problems of the provision of hygienic reliability of drinking water consumption. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2016; 95(11): 1025–8. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-11-1025-1028> (in Russian)
4. Zhuravlev P.V., Aleshnya V.V., Shelyakina T.V., Golovina S.V. Impact of water use conditions on the population's oncological morbidity. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2000; 79(6): 28–30. (in Russian)
5. Zaytseva N.V., Sboev A.S., Kleyn S.V., Vekovshinina S.A. Drinking water quality: health risk factors and efficiency of control and surveillance activities by Rospotrebnadzor. *Analiz riska zdorov'yu*. 2019; (2): 44–57. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2019.2.05> (in Russian)
6. Zaytseva N.V., Kleyn S.V. On assessing potential risk of damage to health when dealing with water collection and purification and probability of its occurrence. *Analiz riska zdorov'yu*. 2018; (3): 40–53. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.3.05> (in Russian)
7. Miftakhova K.R., P'yankova O.G., Rudakova L.V., Glushankova I.S. Chlorination is the main method of disinfection of drinking water. *Ekologiya i nauchno-tehnicheskij progress. Urbanistika*. 2015; (1): 233–42. (in Russian)
8. Egorova N.A., Bukshuk A.A., Krasovskiy G.N. Hygienic assessment of products of chlorination of drinking water, taking into account the multiplicity of pathways of exposure. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2013; 92(2): 18–24. (in Russian)
9. Sboev A.S., Romanenko K.V. Analysis of the impact of organochlorine compounds contained in the water network of the domestic water supply on the

- health of population in cities of the Perm krai. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2016; 95(1): 14–7. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-1-14-17> (in Russian)
10. Ushakova T.I., Revich B.A., Aksel' E.M., Levshin V.F. Persistent organochlorine compounds as a risk factor for breast cancer. *Voprosy onkologii*. 2002; 48(3): 293–300. (in Russian)
 11. Chernichenko I.A., Serdyuk A.M., Litovchenko O.N., Balenko N.V. Carcinogenic hazard of chloroform and other drinking water chlorination by-products. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2009; 88(3): 28–32. (in Russian)
 12. Vozhdaeva M.Yu., Kholova A.R., Vagner E.V., Kantor E.A., Kantor L.I., Trukhanova N.V., et al. The use of results of expanded monitoring research for the integrated assessment of drinking water according to indices of chemical harmlessness. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2018; 97(2): 117–24. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-2-117-124> (in Russian)
 13. Zaytseva N.V., May I.V., Kleyn S.V., Sedusova E.V. An experience of establishing and proving of harm to the public health caused by consumption of drinking water containing hyperchlorination products. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2015; (12): 16–8. (in Russian)
 14. Krasovskiy G.N., Egorova N.A. Chlorination of water as a high hazard to human health. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2003; 82(1): 17–21. (in Russian)
 15. Bove G.E., Rogerson P.A., Vena J.E. Case control study of the geographic variability of exposure to disinfectant byproducts and risk for rectal cancer. *Int. J. Health Geogr.* 2017; 6: 18. <https://doi.org/10.1186/1476-072x-6-18>
 16. Cantor K.P. Carcinogens in drinking water: the epidemiologic evidence. *Rev. Environ. Health*. 2010; 25(1): 9–16. <https://doi.org/10.1515/reveh.2010.25.1.9>
 17. Chowdhury S., Champagne P., McLellan P.J. Models for predicting disinfection byproduct (DBP) formation in drinking waters: A chronological review. *Sci. Total Environ.* 2016; 407(14): 4189–206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.04.006>
 18. Nokes C.J., Fenton E., Randall C.J. Modelling the formation of brominated trihalomethanes in chlorinated drinking waters. *Water Res.* 1999; 33(17): 3557–68. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00081-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00081-0)
 19. Richardson S.D., Plewa M.J., Wagner E.D., Schoeny R., Demarini D.M. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research. *Mutat. Res.* 2007; 636(1–3): 178–242. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001>
 20. Villanueva C.M., Kogevinas M., Grimalt J.O. Haloacetic acids and trihalomethanes in finished drinking waters from heterogeneous sources. *Water Res.* 2003; 37(4): 953–8. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(02\)00411-6](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(02)00411-6)
 21. Avaliani S.L., Novikov S.M., Shashina T.A., Dodina N.S., Kislitsin V.A., Mishina A.L. The urgent problems of the improvement of the environment management system based on the analysis of health risk assessment. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2014; 93(6): 5–8. (in Russian)
 22. Belyaev E.N., Fokin M.V., Novikov S.M., Prusakov V.M., Shashina T.A., Shayakhmetov S.F. Actual problems of improving the assessment of health risk for assurance of the sanitary and epidemiological well-being. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2013; 92(5): 53–5. (in Russian)
 23. Krasovskiy G.N., Rakhmanin Yu.A., Egorova N.A. Hygienic justification of optimization of the integrated assessment of drinking water according to the water quality index. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2015; 94(5): 5–10. (in Russian)
 24. Novikov S.M., Shashina T.A., Dodina N.S., Kislitsin V.A., Vorob'eva L.M., Goryaev D.V., et al. Comparative assessment of the multimedia cancer health risks caused by contamination of the Krasnoyarsk krai regions' environment. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2015; 94(2): 88–92. (in Russian)
 25. Onishchenko G.G., Novikov S.M., Rakhmanin Yu.A., Avaliani S.L., Bushtueva K.A. *Fundamentals of Public Health Risk Assessment from Exposure to Chemical Pollutions [Osnovy otsenki riska dlya zdorov'ya naseleniya pri vozdeystvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu]*. Moscow; 2002. (in Russian)
 26. R 2.1.10.1920-04. Guidelines for health risk assessment of exposure to chemical substances polluting the environment. Moscow; 2004. (in Russian)
 27. Kalashnikova E.G., Arutyunova I.Yu., Gorina E.N., Kalashnikova O.B., Malyshev B.V. Reduction in the content of organochlorine compounds in potable water. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2005; (10–1): 11–7. (in Russian)
 28. Yukhno A.I., Plugotarenko N.K. Analysis of the formation of organochlorine compounds in drinking water. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti*. 2018; (3): 28–35. <https://doi.org/10.25257/TTS.2018.3.79.28-35> (in Russian)
 29. Sepetliev D.A. *Statistical Methods in Scientific Medical Research. [Statisticheskie metody v nauchnykh meditsinskikh issledovaniyakh]*. Moscow: Meditsina; 1968. (in Russian)
 30. Marchenko B.I. *Health at the Population Level: Statistical Research Methods [Zdorov'e na populyatsionnom urovne: statisticheskie metody issledovaniya]*. Taganrog: Sfinks; 1997. (in Russian)
 31. Aydinov G.T., Marchenko B.I., Sofyanikova L.V., Sinel'nikova Yu.A. The application of multidimensional statistical methods in the tasks of improving of information and analytical providing of the system socio-hygienic monitoring. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2015; (7): 4–8. (in Russian)
 32. Aydinov G.T., Marchenko B.I., Sinel'nikova Yu.A. Multivariate analysis of structure and contribution per shares made by potential risk factors at malignant neoplasms in trachea, bronchial tubes and lung. *Analiz riska zdorov'yu*. 2017; (1): 47–55. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2017.1.06> (in Russian)
 33. Aydinov G.T., Marchenko B.I., Kovalev E.V. Modern epidemiological features of cancer incidence of population of Rostov region. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2017; (11): 7–15. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2017-296-11-7-15> (in Russian)