

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 504.05/.06

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-119-131>

Исследование воздействия на здоровье человека и окружающую среду качества воды, поступающей в центральные системы водоснабжения



EDN: GHCRVH

К.Д. Мишина , О.Е. Безбородова ✉, Н.В. Камардина 

Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация

✉ oxana243@yandex.ru

Аннотация

Введение. Обеспечение населения безопасной питьевой водой является одной из ключевых задач охраны здоровья и устойчивого развития, поскольку её качество напрямую влияет на уровень заболеваемости и смертности. По данным ООН и ВОЗ, недостаточная эффективность систем водоподготовки способствует возникновению и распространению инфекционных заболеваний, приводящих к гибели в мире до 1,4 миллиона человек ежегодно. Вместе с тем остаётся недостаточно разработанным вопрос комплексной сравнительной оценки технологий водоподготовки с точки зрения совокупного риска для здоровья населения, учитывающей одновременно химические и микробиологические факторы опасности. Указанный пробел в научном знании обуславливает необходимость исследований, ориентированных не только на достижение нормативных показателей качества воды, но и на интегральную оценку последствий применения различных технологических схем для здоровья человека. В связи с этим целью настоящего исследования является сравнительная оценка эффективности технологий водоподготовки питьевой воды централизованных систем водоснабжения по совокупному риску для здоровья населения, что позволит обосновать выбор оптимальных решений в практике водоподготовки.

Материалы и методы. Информационную базу исследования составили действующие нормативные документы, устанавливающие требования к качеству питьевой воды и технологическим процессам ее подготовки; «Методика разработки реестра НДТ систем водоснабжения и водоотведения»¹; российские и международные стандарты и руководства по оценке риска для здоровья населения; научные статьи и монографии по технологиям фильтрации, коагулирования, осветления, сорбции, окисления и обеззараживания воды. Оценка качества исходной воды выполнялась по основным группам показателей: органолептическим, обобщенным, санитарно-микробиологическим, паразитологическим, а также санитарно-химическим. Для количественной оценки и сравнения различных схем водоподготовки применялись методы математического моделирования и статистической обработки данных. Расчет выполнялся в соответствии с подходами, изложенными в МР 2.1.4.0289–22². На основе классификации источников водоснабжения по качеству воды анализировались рекомендуемые совокупности технологических операций:

- для первого класса — предварительное фильтрование с возможной реагентной обработкой и обязательным обеззараживанием;
- для второго класса — фильтрование (при наличии фитопланктона – микрофильтрование) с коагулированием, отстаиванием и последующим обеззараживанием;
- для третьего класса — добавление второй ступени очистки, включающей осветление, окисление, сорбцию и повторное обеззараживание.

Исследование выполнено с использованием стандартных методик лабораторного анализа качества воды и специализированного программного обеспечения для моделирования и оценки риска.

¹ «Методика разработки реестра наилучших доступных технологий (НДТ) систем водоснабжения и водоотведения», раздел 1 «Водоснабжение», договор №34/08/13 от 18.12.2013 г., том 1, URL: http://nghp-sro.ru/files/news/news137/1_SRO_04-471.pdf (дата обращения 01.04.2026)

² Методические рекомендации МР 2.1.4.0289-22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://cepportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj9le2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxvjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

Результаты исследования. Проведена оценка эффективности действующей технологии (механическая очистка, коагуляция, хлорирование) и предложенной многоступенчатой схемы (включающей ультрафильтрацию, сорбцию и комбинированное обеззараживание). Выполнено математическое моделирование изменения параметров качества воды для трёх сценариев водоподготовки. С использованием специального программного обеспечения проведён модельный эксперимент и оценка изменения качества по четырём группам параметров (органолептические, обобщённые, санитарно-микробиологические и паразитологические, санитарно-химические). По МР 2.1.4.0289–22³ рассчитаны значения совокупного риска и эффективность его снижения в результате водоподготовки; результаты статистически обработаны. На основе данных санитарно-гигиенического мониторинга и расчёта совокупного риска для здоровья населения показано, что исходная вода имеет превышения по ряду показателей. Установлено, что предложенный многоступенчатый метод обеспечивает более глубокую очистку и значительно эффективнее снижает негативное влияние на здоровье по всем группам параметров (органолептическим, обобщённым, санитарно-микробиологическим и санитарно-химическим).

Обсуждение. Проведенный сравнительный анализ эффективности двух методов водоподготовки показал значительное преимущество многоступенчатой схемы очистки. Предложенный комплексный подход полностью обеспечил соответствие качества воды нормативным требованиям по предельно-допустимым значениям за счет сочетания ультрафильтрации, сорбции и комбинированного обеззараживания. Метод многоступенчатой схемы очистки обеспечил не только полную микробиологическую и химическую безопасность, но и высокие органолептические показатели воды, повышая общую надежность системы водоснабжения.

Заключение. В работе проведена сравнительная оценка эффективности двух технологий водоподготовки для централизованной системы водоснабжения г. Пензы. На основе методики расчета совокупного риска для здоровья населения было установлено, что исходная вода из Сурского водохранилища обладает высоким уровнем риска. Показано, что существующий метод очистки (коагуляция и хлорирование) снижает риск до средней эффективности, оставляя систему водоснабжения уязвимой. В свою очередь, предложенный многоступенчатый метод (ультрафильтрация, сорбция, УФ-обеззараживание и хлораминирование) продемонстрировал очень высокую эффективность (82 %), снизив совокупный риск до пренебрежимо малого значения. Результаты доказывают преимущество многоступенчатого подхода и могут служить основанием для модернизации систем водоподготовки с целью повышения их надежности и безопасности для населения.

Ключевые слова: окружающая среда, здоровье человека, центральное водоснабжение, методы очистки природных вод

Для цитирования. Мишина К.Д., Безбородова О.Е., Камардина Н.В. Исследование воздействия на окружающую среду и здоровье человека качества воды, поступающей в центральные системы водоснабжения. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(2):119–131. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-119-131>

Original Empirical Research

Investigation of the Impact of Water Quality in Central Water Supply Systems on Human Health and the Environment

Kristina D. Mishina , Oksana E. Bezborodova ✉, Natalya V. Kamardina 

Penza State University, Penza, Russian Federation

✉ oxana243@yandex.ru

Abstract

Introduction. Providing safe drinking water to the population is a crucial task for health protection and sustainable development, as its quality directly influences the level of morbidity and mortality. The UN and WHO have stated that insufficient efficiency of water treatment systems contribute to the emergence and spread of infectious diseases, causing up to 1.4 million deaths worldwide each year. At the same time, the issue of comprehensive comparative assessment of water treatment technologies in terms of the overall risk to public health remains underdeveloped, considering both chemical and microbiological hazards. This gap in scientific knowledge necessitates research that focuses not only on meeting water quality standards but also on an integrated assessment of the effects of various technological schemes on human health. In this study, we aim to conduct a comparative assessment of the effectiveness of drinking water treatment technologies used in centralized water supply systems in terms of the overall risk to public health. This will make it possible to choose the best solution for water treatment in practice.

³ Методические рекомендации МР 2.1.4.0289-22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://ceportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj9le2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxyjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

Materials and Methods. The information base for the study consisted of current regulatory documents that establish requirements for drinking water quality and technological processes for its preparation, such as the “Methodology for developing a register of BAT for water supply and sanitation systems”; Russian and international standards, and guidelines for assessing public health risks, scientific articles and monographs on filtration, coagulation, clarification, sorption, oxidation, and disinfection of water. The assessment of source water quality was conducted according to the main groups of indicators: organoleptic, generalized, sanitary-microbiological, parasitological, as well as sanitary-chemical. Mathematical modeling and statistical data processing methods were used to quantify and compare different water treatment schemes. The calculation was performed in accordance with the approaches described in MR 2.1.4.0289–22.

Based on the classification of water supply sources by water quality, we analyzed the recommended sets of technological operations:

- for the first class — pre-filtration with optional reagent treatment and mandatory disinfection;
- for the second class — filtration (in the presence of phytoplankton, microfiltration) with coagulation, settling and subsequent disinfection;
- for the third class — additional stage of purification including clarification, oxidation, sorption and repeated disinfection.

The study was performed using standard methods of laboratory analysis of water quality and specialized software for modeling and risk assessment.

Results. The effectiveness of the current treatment technology (mechanical purification, coagulation, and chlorination) and the proposed multistage scheme (including ultrafiltration, sorption, and combined disinfection) were evaluated. Mathematical modeling of changes in water quality parameters for three scenarios of water treatment was performed. Using special software, a model experiment and an assessment of quality changes were conducted for four groups of parameters (organoleptic, generalized, sanitary-microbiological and parasitological, and sanitary-chemical). According to MR 2.1.4.0289–22, the values of integrated risk and the effectiveness of its reduction as a result of water treatment were calculated. The results were statistically processed. Based on the data on sanitary and hygienic monitoring and calculation of the overall risk to public health, the source water was found to have excesses in several indicators. It was established that the proposed multi-stage method provided more thorough purification and significantly reduced the negative impact on health across all groups of parameters (organoleptic, generalized, sanitary-microbiological and sanitary-chemical).

Discussion. A comparative analysis of the effectiveness of the two water treatment methods revealed a significant advantage of the multi-stage purification process. The proposed integrated approach fully ensured that water quality met the regulatory requirements for maximum permissible values through a combination of ultrafiltration, sorption and combined disinfection. The multi-stage purification scheme ensured not only complete microbiological and chemical safety, but also high organoleptic water parameters, enhancing the overall reliability of the water supply system.

Conclusion. The paper provides a comparative assessment of the effectiveness of two water treatment technologies for the centralized water supply system in Penza. Based on the methodology for calculating the overall risk to public health, it was found that the source water from the Surskoye reservoir had a high risk level. The current purification method (coagulation and chlorination) has been shown to reduce the risk to an average level, leaving the water supply system vulnerable. In contrast, the proposed multi-stage method (ultrafiltration, sorption, UV disinfection, and chloroamination) demonstrated very high efficiency (82%) in reducing the cumulative risk to negligible value. These results support the advantages of a multi-stage approach and can serve as a foundation for upgrading water treatment systems to increase their reliability and safety for the public.

Keywords: environment, human health, central water supply, natural water purification methods

For Citation. Mishina KD, Bezborodova OE, Kamardina NV. Investigation of the Impact of Water Quality in Central Water Supply Systems on Human Health and the Environment. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):119–131. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-119-131>

Введение. Обеспечение населения качественной питьевой водой представляет собой проблему планетарного масштаба. Данная проблема обусловлена комплексом факторов, ключевым из которых является доступ к источникам природной воды надлежащего качества. Однако ввиду глобального техногенного воздействия на окружающую среду следует отметить, что природных источников, вода из которых пригодна для питья без предварительной очистки, фактически не существует. Качественный и количественный состав воды в природных источниках питьевого водоснабжения выступает важным фактором, определяющим состояние окружающей среды и санитарно-эпидемиологическое благополучие населения. Согласно данным исследования специального комитета ООН, бремя болезней человека во многом определяется качеством воды, забираемой из при-

родных источников для питьевых целей. С развитием городских территорий и промышленных агломераций возрастает техногенная нагрузка на водные объекты, что приводит к их загрязнению [1]. В связи с этим на первый план выходят технологии водоподготовки, выбор которых должен быть обоснован с учётом санитарно-гигиенических, экологических, технологических и экономических параметров.

Документы всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и национальные нормативные документы РФ устанавливают стандарты качества питьевой воды, направленные на обеспечение безопасности и сохранение здоровья человека. Согласно рекомендациям ВОЗ, качество водоподготовки оценивается по следующим группам факторов: микробиологическим, химическим, радиологическим и сенсорным (в российской терминологии — органолептическим). ВОЗ также подчеркивает значимость мониторинга и регулярной проверки качества воды на всех этапах цепочки поставок — от источника до конечного потребителя. Такой подход гарантирует своевременное выявление отклонений и принятие соответствующих мер, что способствует снижению рисков для здоровья населения и поддержанию общественного благополучия.

Недостаточный уровень водоподготовки влечет за собой возникновение и распространение инфекционных заболеваний (холера, дизентерия, брюшной тиф, гепатит А, полиомиелит) [2], смертность от которых в мире достигает 1,4 миллиона человек в год [3]. Длительное потребление питьевой воды, содержащей химические загрязняющие вещества в концентрациях, превышающих предельно допустимые (ПДК), приводит к развитию патологий органов пищеварения [4], мочевыделительной [5], эндокринной [6] и сердечно-сосудистой систем: нарушению работы сердечной мышцы [7], гипертонии и повышенному кровяному давлению [8], ишемической кардиомиопатии [9]. Кроме того, высокое содержание нитратов в воде приводит к возникновению рака желудка [10]. Присутствие тяжелых металлов вызывает неврологические заболевания у детей: свинец — поражение головного мозга и центральной нервной системы [11], ртуть — нарушение концентрации, потерю памяти, повреждение нервов [12] и рак кожи, отмечают отечественные [13] и зарубежные [14] исследователи. Повышенная жесткость воды способствует накоплению солей в организме человека, что вызывает заболевания суставов и мочекаменную болезнь [15].

В связи с этим совершенствование технологий водоподготовки и водоочистки, а также систем контроля параметров природной и питьевой воды приобретает первостепенное значение. Это требует обоснованного выбора данных технологий и определения совокупности параметров для их сравнительной оценки. Методические рекомендации МР 2.1.4.0289–22⁴ предлагают методику для оценки эффективности мероприятий, направленных на повышение качества питьевой воды в централизованных системах водоснабжения. Сравнительная оценка проводится по таким параметрам, как потенциальный риск для здоровья человека и эффективность водоподготовки.

Несмотря на наличие утвержденных методик оценки риска для здоровья населения от качества питьевой воды, большинство существующих исследований концентрируются на анализе отдельных загрязнителей или оценке эффективности конкретного этапа очистки. Комплексная сравнительная оценка различных технологий водоподготовки на основе показателя совокупного риска для здоровья человека в городе Пенза не проводилась. Такой фрагментарный подход не позволяет в полной мере установить, какая из комбинаций методов очистки является наиболее оптимальной для снижения общего количества болезней, связанного с потреблением воды из конкретного источника. Настоящее исследование направлено на заполнение этого пробела путем системного анализа и сопоставления альтернативных сценариев очистки воды для условий города Пензы.

Одним из природных источников воды для обеспечения центрального водоснабжения г. Пенза является Сурское водохранилище. Согласно данным санитарно-гигиенического мониторинга и классификации природных вод по физико-химическим показателям качества воды, Сурское водохранилище относится к первому классу поверхностных источников [16]. Существующий метод водоподготовки для данного источника включает в себя механическую очистку воды с последующей коагуляцией и флокуляцией, а также проведением обеззараживания методом хлорирования. Согласно данной системе очистки происходит процеживание через фильтрационные решетки исходной природной воды и отстаивание ее в специальных отстойниках для удаления взвесей. После этого вводятся коагулянты, которые способствуют агрегации мелкодисперсных и коллоидных частиц в крупные хлопья, которые потом подвергаются фильтрации. Затем осуществляется обеззараживание воды методом хлорирования, для обеспечения ее бактериальной безопасности при поступлении в центральные системы водоснабжения.

⁴ Методические рекомендации МР 2.1.4.0289–22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://ceportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj9le2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxvjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

Недостатками такого процесса очистки воды, поступающей в центральные системы водоснабжения, являются:

- образование большого объема шлама, который требует утилизации и при хранении оказывает негативное влияние на окружающую среду;
- риск для здоровья населения остаточного содержания алюминия в воде при возможном нарушении дозирования, что влечет за собой нанесение вреда здоровью человека;
- риск для здоровья населения неполного устранения патогенных вирусов и бактерий, что также способствует ухудшению здоровья населения.

Современные технологии водоподготовки основаны на комплексном подходе, реализуемом через многоступенчатую схему, в которой различные методы очистки взаимно дополняют друг друга, компенсируя недостатки каждого отдельного способа. Одна из таких технологий включает стадию предподготовки, направленную на подготовку воды к последующей глубокой очистке; стадию основной обработки, на которой удаляются тонкодисперсные и растворенные загрязнители; стадию обеззараживания, обеспечивающую микробиологическую безопасность воды, поступающей в центральные сети. Предподготовка заключается в механической фильтрации поверхностных вод через барабанные решетки, агрегации мельчайших частиц в крупные хлопья с последующим осаждением и физическим отделением образовавшихся агломератов от очищаемой воды. На данной стадии достигается снижение мутности и цветности, а также удаление до 90 % взвешенных веществ и коллоидных примесей.

Основную очистку осуществляют методами ультрафильтрации и сорбции, удаляя патогенные микроорганизмы, органические соединения, побочные продукты дезинфекции и вещества, вызывающие неприятный привкус и запах.

На стадии обеззараживания вода сначала проходит через камеры с ультрафиолетовым излучением для разрушения ДНК и РНК микроорганизмов, затем в неё дозируется небольшое количество хлорамина для полной дезинфекции, эффект которой сохраняется на протяжении всей распределительной сети. В результате получается вода, безопасная по микробиологическим и химическим показателям, обладающая отличными органолептическими свойствами, подача которой в сеть обеспечивается с минимальными рисками для здоровья потребителей.

На рис. 1 приведены алгоритмы методов очистки воды, поступающей в центральные системы водоснабжения из Сурского водохранилища.

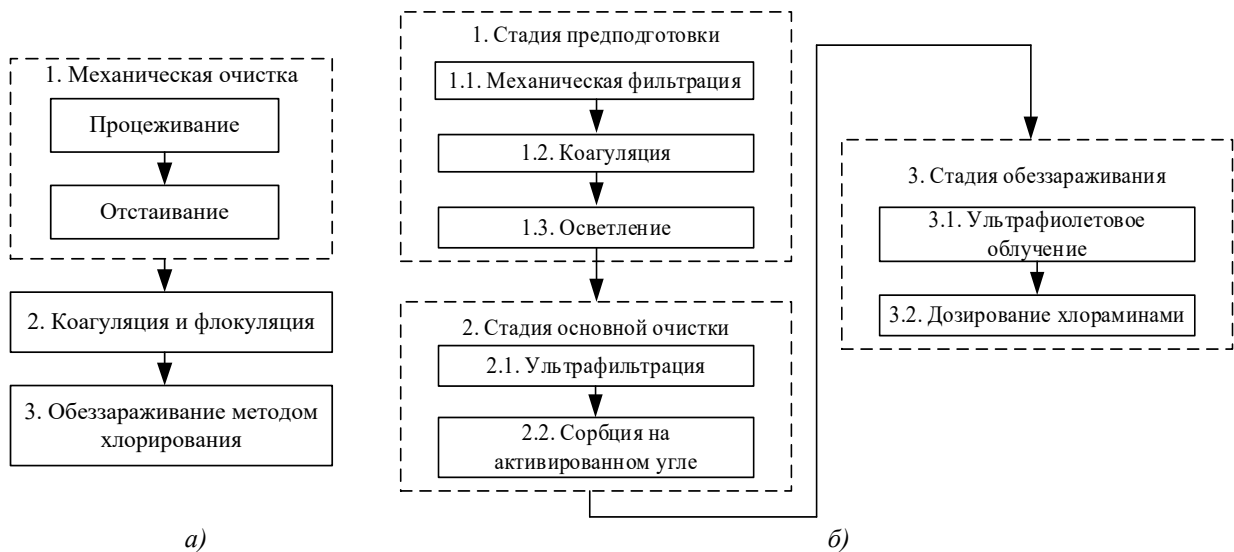


Рис. 1. Алгоритм процесса очистки воды, поступающей в центральные системы водоснабжения: а — метод очистки воды № 1 [17]; б — метод очистки воды № 2 [18]

Для сравнения эффективности очистки представленных методов проведена оценка совокупного риска для здоровья населения и степени эффективности согласно МР 2.1.4.0289-22⁵. Для проведения исследования были выбраны контролируемые параметры, которые оказывают негативное влияние на здоровье человека и в анализируемом водном объекте находятся в превышении предельно допустимых значений (ПДЗ) согласно следующим нормативам ГОСТ⁶ и СанПиН⁷. Было проведено исследование проб воды до проведения очистки и после очистки по двум рассматриваемым методам.

⁵ Методические рекомендации МР 2.1.4.0289-22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://ceportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj9le2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxyjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

⁶ ГОСТ 31952–2012. «Устройства водоочистные. Общие требования к эффективности и методы ее определения». URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293785/4293785990.pdf?ysclid=mnfyc28qpx343642988> (дата обращения 01.04.2026)

⁷ СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». URL: https://nagut6.gosuslugi.ru/netcat_files/174/2801/SP123685_21.pdf?ysclid=mnfyfca8xz794025561 (дата обращения 01.04.2026)

Основная цель данного исследования — сравнительная оценка эффективности технологий водоподготовки питьевой воды централизованных систем водоснабжения по совокупному риску для здоровья человека.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

- проведение анализа физико-химического и биологического состава воды из природных источников водоснабжения города Пензы с целью выявления наиболее значимых загрязнителей;
- расчет совокупного риска, формирующего бремя болезней, для различных сценариев водоподготовки;
- оценка степени эффективности очистки воды, поступающей в централизованные системы водоснабжения.

Новизна работы заключается в применении интегрального подхода, который позволяет не просто констатировать соответствие или несоответствие нормативам, а количественно оценить и сравнить конечный эффект от внедрения различных технологий с точки зрения предотвращения потенциального вреда для здоровья населения.

Материалы и методы. В ходе исследования был выполнен анализ научных публикаций, патентов и нормативных документов, содержащих информацию о составе, показателях и методах водоподготовки. Проведено математическое моделирование с последующей статистической обработкой его результатов. Изучено влияние состава питьевой воды на здоровье человека и качество окружающей среды.

Оценка состава питьевой воды осуществлялась по следующим группам показателей, регламентируемым российскими и международными нормативными документами: органолептическим, обобщенным, санитарно-микробиологическим, паразитологическим и санитарно-химическим.

В качестве критериев оценки качества питьевой воды использовались предельно допустимые значения (ПДЗ), которые установлены российскими нормативными документами. Исследование проводилось на базе Пензенского государственного университета.

Согласно МР 2.1.4.0289–22⁸, для оценки эффективности мероприятий по улучшению качества водоподготовки необходимо рассчитать средние значения по всем совокупностям фактических значений контролируемых параметров до ($\bar{P}_{i,до}$) и после ($\bar{P}_{i,после}$) водоподготовки:

$$\bar{P}_{i,до} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{i,до}}{n}, \quad (1)$$

$$\bar{P}_{i,после} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{i,после}}{n}, \quad (2)$$

где $P_{i,до}$, $P_{i,после}$ — фактические значения контролируемых параметров до и после водоподготовки; n — количество отобранных проб.

Получив средние значения по всем совокупностям фактических значений контролируемых параметров до и после водоподготовки, определяли кратность превышения ПДЗ по формуле:

$$x_i = \frac{\bar{P}_{i,до(после)}}{ПДЗ_i}. \quad (3)$$

Разделив диапазон изменений значений в соответствии с таблицей 1 для каждого из рассчитанных по формуле (3) значений, определяли функцию принадлежности к диапазону $\mu(x)$:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{НГ1} \leq x < x_{ВГ1} \\ \frac{x_i - x_{НГ2}}{x_{ВГ2} - x_{НГ2}}, & \text{если } x_{НГ2} \leq x < x_{ВГ2} \\ 1, & \text{если } x_{НГ3} \leq x < x_{ВГ3} \\ \frac{x_i - x_{НГ4}}{x_{ВГ4} - x_{НГ4}}, & \text{если } x_{НГ4} \leq x < x_{ВГ4} \\ 0, & \text{если } x \geq x_{НГ5} \end{cases}. \quad (4)$$

⁸ Методические рекомендации МР 2.1.4.0289-22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://cepportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj9le2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxvjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

Категории риска для здоровья населения

Характеристика		Категории риска для здоровья населения				
		1	2	3	4	5
Диапазон кратности превышения ПДЗ	$x_{НГ}$	0	0,5	1	2	5
	$x_{ВГ}$	0,5	1	2	5	$+\infty$
Ранг, k		1	2	3	4	5
Категория риска для здоровья		Пренебрежимо малый	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
Риск для здоровья населения		$(0; 1 \cdot 10^{-8}]$	$(1 \cdot 10^{-8}; 1 \cdot 10^{-6}]$	$(1 \cdot 10^{-6}; 1 \cdot 10^{-4}]$	$(1 \cdot 10^{-4}; 1 \cdot 10^{-3}]$	$(1 \cdot 10^{-3}; 1]$

Примечание: НГ — нижняя граница интервала; ВГ – верхняя граница интервала; «) » — обозначает, что значение не принадлежит данному интервалу; «] » — обозначает, что значение принадлежит данному интервалу.

После этого проводили оценку риска для здоровья населения по всем контролируемым параметрам, объединенным в группы (санитарно-химическим). По полученным оценкам для каждого контролируемого параметра рассчитывали весовой коэффициент, устанавливающий связь параметра и класса болезней, определяемого загрязняющими веществами, присутствующими в воде. На следующем этапе исследования, используя принцип Фишберна, определяли, как часто встречался каждый класс болезней при оценке величины риска для здоровья населения по весовым коэффициентам (W). При этом учитывали ранг риска здоровью (k) и ранг класса болезни по степени (l):

$$W = \frac{2 \cdot (k - l + 1)}{(k + 1) \cdot k}, \quad (5)$$

где k — ранг риска здоровью (таблица 1); l — ранг класса болезни по степени тяжести (приложение 2 к МР 2.1.4.0289-22 таблица П2⁹).

Далее для каждого i -го контролируемого показателя в каждой группе определяли весовые коэффициенты (G_i):

$$G_i = \frac{1}{m}, \quad (6)$$

где m — количество всех рассматриваемых показателей в группе: для органолептических — 3, для обобщенных — 5, для санитарно-микробиологических и паразитологических — 6, для санитарно-химических — 9.

За этим последовал расчет совокупного вклада каждой из пяти групп контролируемых параметров (w_k) в общую величину риска для здоровья населения:

$$w_k = \sum_i G_i \cdot \mu_{k,i}. \quad (7)$$

По формуле определяли риск для здоровья населения от воздействия каждой группы контролируемых параметров:

$$R_g = \sum_{k=1}^5 \bar{R}_k \cdot w_k, \quad (8)$$

где R_g — риск для здоровья населения от воздействия каждой группы контролируемых параметров; \bar{R}_k — среднее значение диапазона изменения величины риска для здоровья населения, возникающего в результате воздействия к k -той группе контролируемых параметров.

Совокупный риск рассчитывали для всех контролируемых параметров для двух ситуаций — до и после водоподготовки:

$$R = \frac{1}{V_g} \sum_{p=1}^5 R_g \cdot V_g, \quad (9)$$

где R — совокупный риск для здоровья населения; R_g — значение величины риска для здоровья населения для каждой группы контролируемых параметров; V_g — суммарный весовой коэффициент k -той группы контролируемых параметров при определении совокупного риска для здоровья населения; \bar{V}_g — средний весовой коэффициент k -той группы контролируемых параметров при определении совокупного риска для здоровья населения (рис. 2).

⁹ Методические рекомендации МР 2.1.4.0289-22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://cepportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj9le2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxvjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

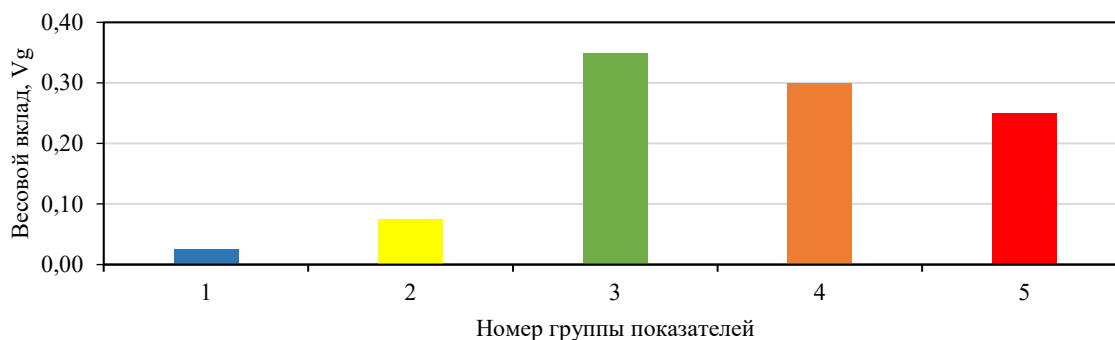


Рис. 2. Весовые коэффициенты V_g для различных групп показателей: 1 — органолептических; 2 — обобщенных; 3 — санитарно-микробиологических и паразитологических; 4 — радиационных; 5 — санитарно-химических.

При расчете эффективности снижения риска для здоровья населения в результате водоподготовки (Ξ) учитывали значение совокупных рисков до ($\bar{R}_{до}$) и после ($\bar{R}_{после}$) водоподготовки:

$$\Xi = \frac{\bar{R}_{до} - \bar{R}_{после}}{\bar{R}_{до}} \cdot 100 \% \quad (10)$$

По полученному значению Ξ (%) определили качественное значение степени эффективности проведенных мероприятий (рис. 3).

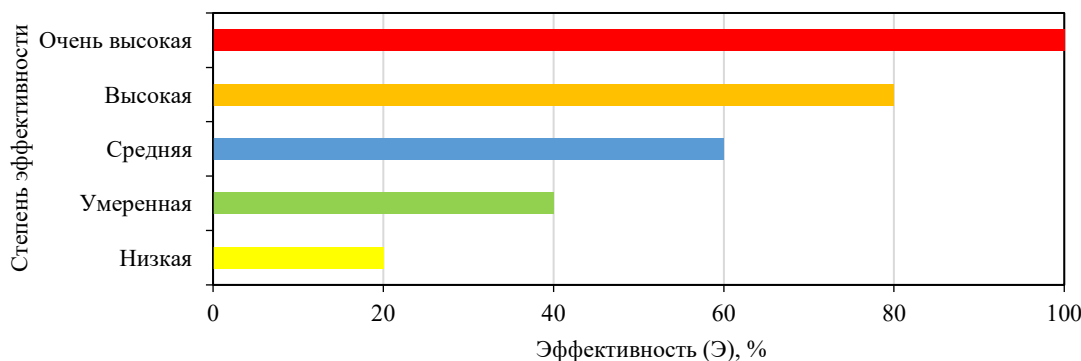


Рис. 3. Эффективность водоподготовки, %

Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения в проведенном исследовании проводилась с использованием программы, реализующей МР 2.1.4.0289–22¹⁰. Исходные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2

Данные санитарно-гигиенического мониторинга воды, поступающей в центральные системы водоснабжения

№	Наименование контролируемого параметра	Группа параметров	Единицы измерения	ПДЗ	Значение параметров до очистки	Значение параметров после очистки методом № 1	Значение параметров после очистки методом № 2
1	Запах	Органолептические показатели	баллы	2	3	1	1
2	Цветность		градусы	20	25	16	10
3	Мутность по формазину		ЕМФ	2,6	5	2,0	0,5
4	Сухой остаток	Обобщенные показатели	г/м ³	1	1,5	0,15	0,11
5	Жесткость		мг·экв/л	7	20	10	6
6	Нефтепродукты		мг/л	0,1	0,2	0	0

¹⁰ Методические рекомендации МР 2.1.4.0289-22 «Комплексная оценка эффективности мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 1 июня 2022 г.). URL: <https://ceportal.ru/upload/iblock/009/44r5ndj91e2pp2uhlas9txk6c35956dl.pdf?ysclid=mnfxyjeh4k339528214> (дата обращения 01.04.2026)

№	Наименование контролируемого параметра	Группа параметров	Единицы измерения	ПДЗ	Значение параметров до очистки	Значение параметров после очистки методом № 1	Значение параметров после очистки методом № 2
7	ПАВ анионоактивные		мг/л	0,5	0,5	0	0
8	Водородный показатель		ед.	6—9	8	7	7
9	Общее микробное число (ОМЧ)	Санитарно-микробиологические и паразитологические	КОЕ/см ³	50	60	45	35
10	Escherichiacoli (E.coli)		КОЕ/100 см ³	есть / нет	есть	нет	нет
11	Энтерококки		КОЕ/100 см ³	есть / нет	нет	нет	нет
12	Колифаги		КОЕ/100 см ³	есть / нет	нет	нет	нет
13	Цисты и ооцисты патогенных простейших		Определение в 50 л	есть / нет	нет	нет	нет
14	Возбудители кишечных инфекций		Определение в 10 л	есть / нет	нет	нет	нет
15	Аммиак и аммоний-ион	Санитарно-химические показатели	мг/л	2	4,2	1,8	1,1
16	Медь		мг/л	0,5	1,5	0,25	0,05
17	Кадмий		мг/л	0,001	0,0012	0	0
18	Сульфаты (SO ₄ ²⁻)		мг/л	500	528	385,0	250,0
19	Нитраты (по NO ₃ ⁻)		мг/л	45	90	40,0	25,0
20	Нитриты (по NO ₂ ⁻)		мг/л	3	4,8	3,0	1,2
21	Железо		мг/л	0,3	0,6	0,3	0,1
22	Хлориды (по Cl)		мг/л	350	375	345,0	263,0
23	Цинк		мг/л	5	5,5	4,0	2,5

Результаты исследования. Результаты расчета параметров для оценки эффективности водоподготовки приведены в таблице 3. Рассмотрены три варианта: до проведения очистки, после очистки методом № 1, после очистки методом №2.

Таблица 3

Доля вклада каждой группы параметров

№	Группа параметров (показатели)	Риск группы				
		До очистки	После очистки методом № 1	Снижение негативного влияния после очистки методом № 1	После очистки методом № 2	Снижение негативного влияния после очистки методом № 2
1	Органолептические	0,42	0	0,42	0	0,42
2	Обобщенные	0,31	0,21	0,10	0,19	0,12
3	Санитарно-микробиологические и паразитологические	0,04	0,03	0,01	0	0,04
4	Санитарно-химические	0,09	0,03	0,06	0	0,09

По данным таблицы 1 видно, что в исходной воде (до очистки) практически все контролируемые параметры превышают ПДЗ. Наибольший совокупный риск в этом случае формируют органолептические (0,42) и обобщенные показатели (0,31), что обусловлено значительным превышением нормативов по мутности, цветности, жесткости и сухому остатку. Санитарно-химические показатели также вносят существенный вклад (0,09) за счет повышенных концентраций меди, нитратов, нитритов и аммиака.

Полученные результаты демонстрируют разный уровень очистки двух рассматриваемых методов. На основании проведенных расчетов определена степень эффективности очистки по каждому методу (таблица 4).

Таблица 4

Совокупный риск для здоровья населения для каждого сценария водоподготовки

Сценарий	Совокупный риск, R	Эффективность, %	Степень эффективности
До очистки	0,36	–	–
После очистки методом № 1	0,16	55	средняя
После очистки методом № 2	0,007	82	очень высокая

Установлено, что применение метода очистки воды №1 показывает среднюю эффективность очистки, поскольку риск для здоровья населения снижается с 0,36 до 0,16. При этом в воде сохраняются физические тонкодисперсные примеси, химические загрязнители (нитраты, нитриты), ионы некоторых металлов (например, алюминия), побочные продукты обеззараживания (соединения хлора). Метод № 2 обеспечивает снижение совокупного риска до 0,007, что свидетельствует о высокой эффективности водоподготовки.

На рис. 4 наглядно представлена динамика риска для здоровья населения по каждой группе контролируемых параметров. На гистограмме продемонстрировано исключение риска для здоровья населения по органолептическим и санитарно-химическим показателям качества воды в результате применения метода очистки № 2.

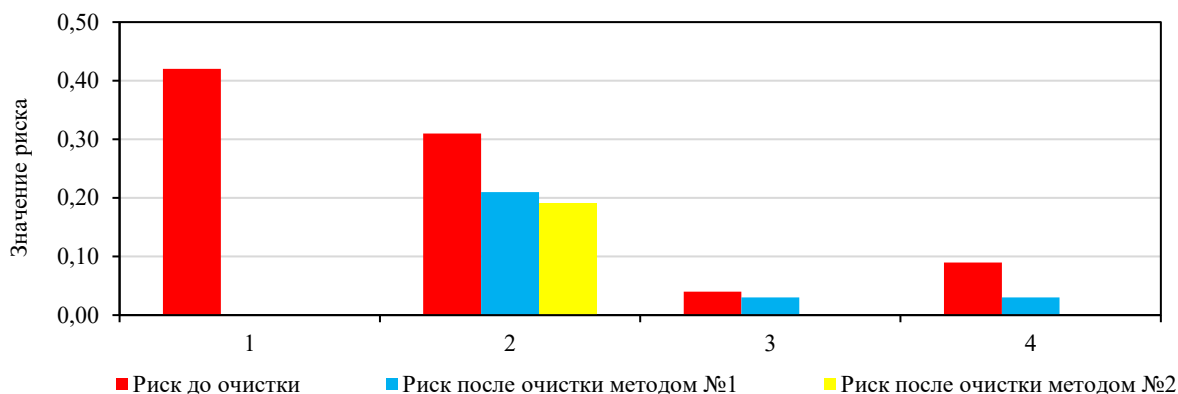


Рис. 4. Значение риска для каждой группы контролируемых параметров: 1 — органолептические показатели; 2 — обобщенные показатели; 3 — санитарно-микробиологические и паразитологические; 4 — санитарно-химические показатели.

На рис. 5, 6 приведено графическое представление результатов расчетов.

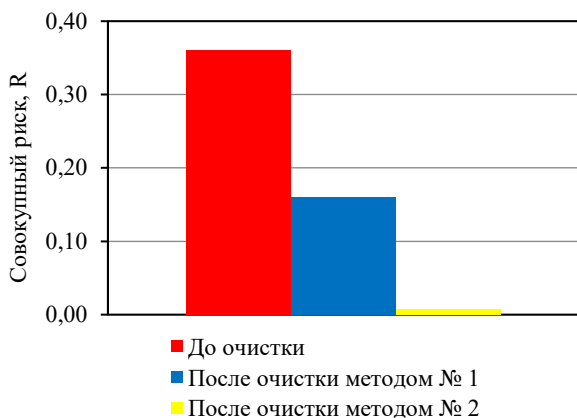


Рис. 5. Совокупный риск для каждого сценария очистки

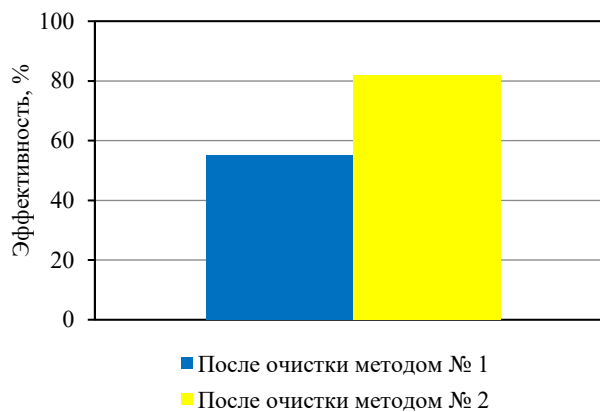


Рис. 6. Эффективность очистки рассматриваемых методов очистки

Обсуждение. Проведенное исследование наглядно демонстрирует существенные различия в эффективности двух рассмотренных подходов к водоочистке Сурского водохранилища. Анализ данных, представленных в таблице 2 и на рис. 4, показывает, что исходная вода по многим ключевым параметрам (запах, цветность, мутность, жесткость, аммиак, нитраты и др.) не соответствует санитарным нормативам, что подтверждает высокий исходный совокупный риск для здоровья населения (таблица 3).

Существующая технология № 1, основанная на коагуляции и хлорировании, действительно приводит большинство параметров в рамки предельно допустимых значений. Однако её эффективность можно охарактеризовать как недостаточную. По ряду критически важных показателей, таких как нитриты (3,0 мг/л при ПДЗ 3 мг/л) и железо (0,3 мг/л при ПДЗ 0,3 мг/л), водоподготовка происходит лишь до верхней границы норматива. Это не создает необходимого «запаса прочности» и оставляет систему уязвимой при сезонных ухудшениях качества исходной воды. Как следствие, после применения технологии № 1 сохраняется значительный остаточный риск по группам обобщенных (0,21) и санитарно-химических (0,03) показателей (рис. 5), что связано с неполным удалением тонкодисперсных примесей, растворенных химических веществ и образованием побочных продуктов хлорирования.

В свою очередь, предложенный многоступенчатый способ № 2 демонстрирует кардинально более высокий уровень водоподготовки. Он не просто приводит параметры в соответствие с ПДЗ, а значительно снижает их концентрацию. Например, мутность уменьшается до 0,5 ЕМФ (при норме 2,6), концентрация сульфатов — до 250 мг/л (при норме 500), а аммоний-иона — до 1,1 мг/л (при норме 2). Такая глубокая очистка является прямым следствием технологических особенностей данного подхода: ультрафильтрация и сорбция эффективно удаляют как взвешенные частицы, так и растворенные органические и химические соединения, а двухстадийное обеззараживание (УФ-излучение + хлорамин) обеспечивает полную микробиологическую безопасность при минимизации побочных продуктов.

Ключевым результатом является динамика снижения совокупного риска, представленная на рис. 5. Способ № 2 полностью (до нуля) устраняет риски, связанные с органолептическими, санитарно-микробиологическими и санитарно-химическими показателями. Общий совокупный риск снижается до пренебрежимо малого значения 0,007. Это свидетельствует о том, что данная технология позволяет получать питьевую воду не только формально безопасную, но и качественно лучшую, с превосходными органолептическими свойствами, что повышает надежность и безопасность всей системы централизованного водоснабжения.

Заключение. В рамках данного исследования была успешно решена поставленная цель — проведена сравнительная оценка эффективности двух технологий водоподготовки питьевой воды на основе показателя совокупного риска для здоровья человека.

В ходе работы были выполнены следующие задачи:

- проведен анализ состава воды из Сурского водохранилища, который выявил превышение ПДЗ по ряду органолептических, обобщенных и санитарно-химических параметров, что обуславливает высокий исходный совокупный риск для здоровья населения, рассчитанный на уровне 0,36;
- выполнен расчет совокупного риска для трех сценариев: до водоподготовки, после применения существующей технологии № 1 и после применения предложенной технологии № 2;
- проведена оценка эффективности, которая показала, что существующая технология № 1 обладает средней степенью результативности (55 %), в то время как предложенная технология № 2 — очень высокой (82 %).

Проведенное исследование доказало, что существующая технология водоподготовки, основанная на коагуляции и хлорировании, является недостаточно эффективной. Она снижает совокупный риск лишь до 0,16, оставляя остаточные риски по обобщенным и санитарно-химическим показателям и не создавая необходимого запаса надежности, поскольку концентрации некоторых загрязнителей остаются на верхней границе нормативов.

В то же время наглядно продемонстрировано, что предложенный многоступенчатый способ № 2, включающий ультрафильтрацию, сорбцию и двухстадийное обеззараживание, позволяет достичь кардинально более высокого уровня водоочистки. Данная технология снижает совокупный риск до пренебрежимо малого значения 0,007, полностью устраняя риски по органолептическим, санитарно-микробиологическим и санитарно-химическим показателям.

Таким образом, работа показывает, что применение современных многоступенчатых технологий водоподготовки позволяет не просто формально соблюдать нормативы, а получать питьевую воду значительно более высокого качества. Это обеспечивает создание «запаса прочности» системы водоснабжения при сезонных и аварийных ухудшениях качества исходной воды. Полученные результаты могут быть использованы в качестве научного обоснования для принятия решений о модернизации действующих станций водоподготовки и внедрения наилучших доступных технологий для обеспечения населения качественной и безопасной питьевой водой.

Список литературы / References

1. Клейн С.В., Вековшинина С.А. Приоритетные факторы риска питьевой воды систем централизованного питьевого водоснабжения, формирующие негативные тенденции в состоянии здоровья населения. *Анализ риска здоровью*. 2020;3:49–60. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.06>
- Kleyn SV, Vekovshinina SA. Priority Risk Factors Related to Drinking Water from Centralized Water Supply System that Create Negative Trends in Population Health. *Health Risk Analysis*. 2020;3:49–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.06>
2. Богданьянц М.В. Влияние качества питьевой воды на заболеваемость детского населения. *Сибирское медицинское обозрение*. 2024;4:23–33. <https://doi.org/10.20333/25000136-2024-4-23-33>
- Bogdanyants MV. Effect of Drinking Water Quality on the Morbidity of Paediatric Population. *Siberian Medical Review*. 2024;4:23–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.20333/25000136-2024-4-23-33>
3. Иванов С.В., Федорова Э.Л., Темиров Э.Э. Влияние качества воды на здоровье населения. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017;3(2):186–189.
- Ivanov SV, Fedorova EL, Temirov EE. Influence of Water Quality on Population Health. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2017;3(2):186–189. (In Russ.)
4. Маркова Е.О., Корякина Ю.П., Фаращук Н.Ф., Киган М.А. Влияние химических веществ питьевой воды на здоровье населения. *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*. 2023;1:239–249. <https://doi.org/10.37903/vsgma.2023.1.31>
- Markova EO, Koriakina YuP, Farashchuk NF, Kigan MA. Influence of Drinking Water Chemical Substances on Public Health. *Vestnik of Smolensk State Medical Academy*. 2023;1:239–249. (In Russ.) <https://doi.org/10.37903/vsgma.2023.1.31>
5. Cotruvo JA, Amato H. National Trends of Bladder Cancer and Trihalomethanes in Drinking Water: A Review and Multicountry Ecological Study. *Dose Response*. 2019;17(1):1559325818807781. <https://doi.org/10.1177/1559325818807781>
6. Uhl M, Santos RR, Costa J, Santos O, Virgolino A, Evans DS, et al. Chemical Exposure: European Citizens' Perspectives, Trust, and Concerns on Human Biomonitoring Initiatives, Information Needs, and Scientific Results. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(4):1532. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041532>
7. Wei-Yi Wu, Pei-Li Chou, Jyh-Chin Yang, Chiang-Ting Chien. Silicon-Containing Water Intake Confers Antioxidant Effect, Gastrointestinal Protection, and Gut Microbiota Modulation in the Rodents. *PLoS One*. 2021;16(3):e0248508 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248508>
8. Richardson SD, Ternes TA. Water Analysis: Emerging Contaminants and Current Issues. *Analytical Chemistry*. 2022;94(1):382–416. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c04640>
9. Shannon MA, Bohn PW, Elimelech M, Georgiadis JG, Mariñas BJ, Mayes AM. Science and Technology for Water Purification in the Coming Decades. *Nature*. 2008;452:301–310. <https://doi.org/10.1038/nature06599>
10. Jia-Qian Jiang. The Role of Coagulation in Water Treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2015;8:36–44 <https://doi.org/10.1016/j.coche.2015.01.008>
11. Vannucci L, Fossi C, Quattrini S, Guasti L, Pampaloni B, Gronchi G, et al. Calcium Intake in Bone Health: A Focus on Calcium-Rich Mineral Waters. *Nutrients*. 2018;10(12):1930 <https://doi.org/10.3390/nu10121930>
12. Rutjes AWS, Denton DA, Di Nisio M, Lee-Yee Chong, Abraham RP, Al-Assaf AS, et al. Vitamin and Mineral Supplementation for Maintaining Cognitive Function in Cognitively Healthy People in Mid and Late Life. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2018;12(12):CD011906. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD011906.pub2>
13. Дахова, Е.В., Целых Е.Д. Влияние состава питьевой воды на состояние некоторых систем организма человека. *Ученые заметки ТОГУ*. 2015;6(4):446–451.
- Dakhova EV, Celikh ED. Influence of Drinking Water in the State of Some Human Body Systems. *Scientists Notes PNU*. 2015;6(4):446–451. (In Russ.)
14. Pelczyńska M, Moszak M, Bogdański P. The Role of Magnesium in the Pathogenesis of Metabolic Disorders. *Nutrients*. 2022;14(9):1714. <https://doi.org/10.3390/nu14091714>
15. Farrell-Poe K, Jones-McLean L, McLean S. *Nitrate in Private Water Wells*. Arizona Cooperative Extension; 2010. URL: <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1486i.pdf> (accessed 18.05.2026)
16. Васильев В.В., Рябинина Т.В., Перекусихин М.В., Васильев Е.В. Обеспечение населения региона качественной питьевой водой в рамках реализации проекта «Чистая вода» в Пензенской области. *ЗНУСО*. 2021;2:35–42. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-335-2-35-42>
- Vasilyev VV, Ryabinina TV, Perekusihin MV, Vasilev EV. Provision of Safe Drinking Water to the Local Population within the Clean Water Project Implemented in the Penza Region. *Public Health and Life Environment – PH&LE*. 2021;2:35–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-335-2-35-42>

17. Макаров А.Л., Беляев А.П. Методы очистки воды. *StudNet*. 2020;3(4):230–234.

Makarov AL, Belyaev AN. Industrial Methods of Water Treatment. *StudNet*. 2020;3(4):230–234. (In Russ.)

18. Новикова А.Е., Руина К.С. Современные методы очистки воды. *Вестник науки*. 2021;1(34):146–149.

Novikova AE, Ruin KS. Modern Water Purification Methods. *Vestnik Nauki*. 2021;1(34):146–149. (In Russ.)

Об авторах:

Кристина Дмитриевна Мишина, аспирант, ассистент кафедры «Техносферная безопасность» Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), kristina_mishina_1998@mail.ru

Оксана Евгеньевна Безбородова, доктор технических наук, заведующая кафедрой «Техносферная безопасность» Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), oxana243@yandex.ru

Наталья Владленовна Камардина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность» Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40), [SPIN-код](#), [ORCID](#), alisa-melafon@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

К.Д. Мишина: проведение расчета, математического моделирования.

О.Е. Безбородова: описание теоретической части статьи.

Н.В. Камардина: анализ существующих источников, оформление научной статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Kristina D. Mishina, Postgraduate Student, Assistant of the Technosphere Safety Department, Penza State University (40, Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), kristina_mishina_1998@mail.ru

Oksana E. Bezborodova, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Technosphere Safety Department, Penza State University (40, Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), oxana243@yandex.ru

Natalya V. Kamardina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Technosphere Safety Department, Penza State University (40, Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), alisa-melafon@mail.ru

Claimed Contributorship:

KD Mishina: calculation, mathematical modeling.

OE Bezborodova: theoretical part.

NV Kamardina: analysis, writing – original draft preparation.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 24.01.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 27.02.2026

Принята к публикации / Accepted 10.03.2026