



Многолетняя динамика и сезонность санитарно-бактериологических показателей речной воды Нижнего Дона. Тенденции и прогнозы

П.В. Журавлев¹, Б.И. Марченко², О.А. Нестерова²

¹ ФБУН «Ростовский НИИ микробиологии и паразитологии» Роспотребнадзора, пер. Газетный, 119, г. Ростов-на-Дону, 344000, Российская Федерация

² ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» Минобрнауки России, ул. Б. Садовая, д. 105/42, г. Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация

Резюме

Введение. При ведении социально-гигиенического мониторинга к ключевым направлениям предупреждения распространения через водную среду инфекционных заболеваний относятся санитарно-микробиологические исследования, проводимые в целях оценки и прогнозирования состояния поверхностных источников питьевой воды, а также используемых для рекреационной деятельности водоемов и водотоков.

Цель исследования: анализ результатов санитарно-бактериологических исследований воды участка Нижнего Дона с определением тенденций и сезонности за многолетний период, а также сравнительная оценка точности среднесрочного прогнозирования на основе методов регрессионного моделирования и искусственных нейронных сетей.

Материалы и методы. Применены результаты санитарно-бактериологических исследований 540 проб речной воды, отобранных в акватории города Азова Ростовской области в 2005–2020 гг. Определялось содержание патогенных энтеробактерий (сальмонелл), потенциально патогенных бактерий (клебсиелл и синегнойных палочек), а также общих, термотолерантных и глюкозоположительных колиформных бактерий. При проведении статистического анализа материалов исследования применялся специально созданный софт, а также программные комплексы IBM SPSS Statistics версии 20.0 и Matlab R2021a с включенным в нее модулем Neural Network Toolbox.

Результаты. Анализ результатов выявил высокий уровень бактериального загрязнения воды в нижнем течении реки Дон, в том числе потенциально патогенными и патогенными микроорганизмами, что свидетельствует о существенном потенциальном эпидемическом риске возникновения и распространения кишечных инфекций. Выявлены тенденции к увеличению содержания в речной воде термотолерантных колиформных бактерий, в том числе *Klebsiella* spp., а также *Pseudomonas aeruginosa*. Были определены сезонные особенности содержания исследуемой микрофлоры.

Выводы. Использование при проспективном анализе нейросетевых моделей предоставляет возможность получать более точные среднесрочные прогнозы санитарно-бактериологических показателей речной воды, чем при применении метода экстраполяционного прогнозирования на основе регрессионного анализа. Выявление сезонных особенностей санитарно-бактериологических характеристик речной воды позволяет определять границы временных интервалов с высокой вероятностью распространения водообусловленных инфекционных заболеваний.

Ключевые слова: вода поверхностных водотоков, санитарно-бактериологические показатели, многолетняя динамика, помесечная динамика и сезонность, искусственная нейронная сеть, среднесрочное прогнозирование, социально-гигиенический мониторинг.

Для цитирования: Журавлев П.В., Марченко Б.И., Нестерова О.А. Многолетняя динамика и сезонность санитарно-бактериологических показателей речной воды Нижнего Дона. Тенденции и прогнозы // Здоровье населения и среда обитания. 2025. Т. 33. № 11. С. 51–62. doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-11-51-62

Long-Term Dynamics and Seasonality of Bacteriological Water Quality Parameters of the Lower Don: Trends and Forecasts

Piotr V. Zhuravlev,¹ Boris I. Marchenko,² Olesja A. Nesterova²

¹ Rostov Research Institute of Microbiology and Parasitology, 119 Gazetny Lane, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

² Southern Federal University, 105/42 Bolshaya Sadovaya Street, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

Summary

Introduction: When conducting environmental public health surveillance, the key areas for preventing the spread of waterborne diseases include microbiological testing aimed to assess and predict the quality of surface sources for drinking water and of recreational water bodies and watercourses.

Objectives: To analyze the results of bacteriological testing of the Lower Don water samples, to establish long-term pollution trends and seasonality, and to compare the accuracy of medium-term forecasting based on regression modeling and artificial neural networks.

Materials and methods: We used the results of bacteriological testing of 540 river water samples taken in the water area of the city of Azov, Rostov Region, in 2005–2020 for pathogenic *Enterobacteriaceae* (*Salmonella* spp.), opportunistic pathogens (*Klebsiella* spp. and *Pseudomonas aeruginosa*), and general, thermotolerant and glucose-positive coliforms. Specially created software, as well as IBM SPSS Statistics version 20.0 and Matlab R2021a with the Neural Network Toolbox module were used for statistical data analysis.

Results: We established high levels of bacterial water pollution in the lower reaches of the Don River with opportunistic and pathogenic microorganisms posing a high epidemic risk of the occurrence and spread of intestinal infections. We also observed rising trends in the density of thermotolerant coliforms, including *Klebsiella* spp. and *Pseudomonas aeruginosa*, in river water and their seasonal fluctuations.

Conclusions: Compared to extrapolative forecasting based on regression analysis, the use of neural network models in prospective analysis enables more accurate medium-term forecasts of bacteriological quality parameters of river water. Identification of their seasonal fluctuations facilitates determination of time spans with a high probability of the spread of waterborne infectious diseases.

Keywords: surface water, bacteriological parameters, long-term dynamics, monthly dynamics and seasonality, artificial neural network, medium-term forecasting, environmental public health surveillance.

Cite as: Zhuravlev PV, Marchenko BI, Nesterova OA. Long-term dynamics and seasonality of bacteriological water quality parameters of the Lower Don: Trends and forecasts. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2025;33(11):51–62. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-11-51-62

Введение. В качестве важнейшей задачи в сфере обеспечения санитарно-эпидемиологической безопасности населения выступает систематический мониторинг состояния водных ресурсов, используемых для питьевого водоснабжения и рекреационной деятельности [1–3]. Усиливающееся микробное загрязнение поверхностных водоемов и водотоков, в том числе штаммами патогенных и условно-патогенных бактерий, устойчивых к антибиотикам, как напрямую создает повышенную опасность распространения массовых инфекционных заболеваний, передающихся водным путем, так и опосредованно способствует нарушению естественных процессов самоочищения, разбалансировке микробиоценозов и увеличению сроков выживания патогенной микрофлоры в водной среде. Значительное влияние на повышение степени загрязнения водной среды оказывают современные тенденции роста потребления воды и увеличения объемов образующихся сточных вод [4–9]. В связи с тем что на динамику эпидемического процесса инфекционных заболеваний, связанных с водным фактором, оказывает влияние сочетание разнообразных свойств среды обитания, в том числе социально-экономических, санитарно-гигиенических, биологических и природных факторов, одним из многообещающих направлений при реализации «Концепции развития системы социально-гигиенического мониторинга в Российской Федерации на период до 2030 года»¹ может стать включение в него специализированных научных и организационно-методических положений эпидемиологического надзора [10]. В связи с этим особое значение приобретает оптимизация динамического санитарно-микробиологического контроля водных объектов и прибрежных зон, предназначенных для рекреационной деятельности населения, как важной составляющей системы эпидемиологического надзора [11–18]. К числу перспективных направлений повышения информативности и результативности аналитических исследований в рамках ведения санитарно-микробиологического мониторинга водных объектов, наряду с широким использованием традиционных методов анализа уровня, структуры, динамики, пространственной характеристики и прогнозирования, относятся различные инновационные подходы, включая применение многомерной статистики и искусственных нейронных сетей [10, 19–21]. В целях характеристики степени микробной опасности для здоровья человека предложены различные методы количественной оценки потенциального эпидемического риска, которые выступают в качестве действенного инструментария, позволяющего, исходя из обнаруженных показателей фекального загрязнения водоемов и водотоков,

определять вероятность наличия в воде патогенов, вызывающих кишечные инфекции [22–26].

Целью исследования является анализ результатов санитарно-бактериологических исследований воды участка Нижнего Дона с определением тенденций и сезонности за многолетний период, а также сравнительная оценка точности среднесрочного прогнозирования на основе методов регрессионного моделирования и искусственных нейронных сетей.

Материалы и методы. В целях гарантированного обеспечения сопоставимости результатов в динамике за многолетний период применена база данных за 2005–2020 гг., сформированная на основе санитарно-бактериологических исследований 540 проб речной воды проведенных в ФБУН «Ростовский научно-исследовательский институт микробиологии и паразитологии» специалистами лаборатории санитарной микробиологии водных объектов и микробной экологии человека согласно актуальным для указанного периода санитарным правилам и нормам², а также методическим указаниям³. Полученные в соответствии с новым СанПиН 1.2.3685-21⁴ данные за 2021–2024 гг. в настоящей работе не были использованы, так как внесенные изменения в номенклатуру микробиологических исследований не позволяют сформировать достаточно продолжительные и гомогенные динамические ряды, необходимые для анализа тенденций в многолетней динамике санитарно-бактериологических показателей, особенностей их сезонности и среднесрочного прогнозирования методами регрессионного анализа и искусственных нейронных сетей.

Отбор проб речной воды осуществлялся в трех специально выделенных контрольных точках мониторинга (ТМ), локализованных в пределах города Азова Ростовской области по ходу течения реки Дон. Первая контрольная точка (ТМА) относится к водозаборной зоне городской системы централизованного водоснабжения, вторая контрольная точка (ТМВ) соответствует зоне рекреации (городскому пляжу), а третья (ТМС) расположена на дистанции 500 метров ниже по течению от зоны сброса сточных вод общегородской канализации. Во всех исследованных пробах определялось содержание общих (ОКБ) и термотолерантных (ТКБ) колиформных бактерий, потенциально патогенных бактерий (*Pseudomonas aeruginosa* и *Klebsiella* spp.), патогенных энтеробактерий (*Salmonella* spp.). В качестве дополнительного санитарно-бактериологического показателя (СБП) количественно анализировалось присутствие в воде глюкозоположительных колиформных бактерий (ГКБ), к которым относятся разнообразные потенциально патогенные и патогенные энтеробактерии,

¹ Об утверждении концепции развития системы социально-гигиенического мониторинга в Российской Федерации на период до 2030 года: Приказ руководителя Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) от 26.08.2019. № 665. М.: Роспотребнадзор, 2019. 27 с.

² СанПиН 2.1.5.980-00 «Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Санитарные правила и нормы» / утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 22 июня 2000 г. (с изм. от 04.02.2011, с изм. от 25.09.2014) (документ утратил силу).

³ МУК 4.2.1884-04 «Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов: методические указания» / утв. и введ. в действие Главным государственным санитарным врачом, Первым заместителем Министра здравоохранения Российской Федерации Г.Г. Онищенко 3 марта 2004 г.

⁴ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания / утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2 (с изменениями на 30 декабря 2022 года).

<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-11-51-62>
Original Research Article

включая сальмонеллы и шигеллы. Для выделения сальмонелл применялась подавляющая рост сопутствующей микрофлоры специальная жидкая среда накопления [27]. При анализе результатов исследований применены методы вариационной статистики, включая критерий *t*-Стьюдента, критерий Шовене для проверки вариационных и динамических рядов на наличие аномальных («выскакивающих») величин, а также универсальный метод Пригге для расчета доверительных границ относительных показателей.

При анализе и моделировании многолетней динамики на основе динамических рядов из средне-годовых уровней СБП проводился подбор адекватной аппроксимирующей функции из числа линеаризуемых (прямолинейных, степенных, экспоненциальных и логарифмических), а также парабол 2-го или 3-го порядка с оценкой их статистической значимости ($p < 0,05$). Осуществлялись построение и характеристика теоретических линий многолетних тенденций по значениям их среднегодовых темпов прироста или убыли, определение многолетней цикличности с диагностикой нерегулярных флюктуаций, а также среднесрочное экстраполяционное прогнозирование.

В целях изучения влияния сезонных факторов на уровень бактериального загрязнения речной воды, исходя из средних за многолетний период помесечных СБП, исчислялись значения верхних границ их круглогодичных уровней (ВГКУ), которые служили количественными ориентирами для определения времени начала и окончания действия сезонных подъемов. Типовые годовые кривые (ТГК) и их верхние доверительные границы (ВДГ) ($p < 0,05$) использовались как основа для дифференциации круглогодичной, сезонной и внесезонной компонент в годовой динамике СБП⁵. Для количественной оценки степени активации сезонных факторов определялись индексы сезонных колебаний (ИСК) как итог процедуры деления помесечных показателей ТГК на их общее среднее и индексы сезонности по Уоррингеру (ИСУ), представляющие собой отношение максимальных и минимальных помесечных показателей ТГК. Проведена сравнительная оценка точности результатов среднесрочного прогнозирования СБП, полученных методами экстраполяции по построенным трендам многолетней динамики и искусственных нейронных сетей на основе временных рядов данных за 2005–2018 гг. В качестве критериев при сопоставлении точности прогнозов применялись величины их абсолютных и относительных погрешностей по отношению к фактическим значениям СБП в 2019 и 2020 гг.

В работе использовались разработанные авторами специализированные информационно-аналитические программные системы – «Microbiology of Surface Waters» версии 1.6 и «Turbo Dinamics» версии 2.51. При статистической обработке материалов исследования также применялся профессиональный программный пакет IBM SPSS Statistics («Statistical Package for Social Science») версии 20.0.

Искусственные нейронные сети (ИНС) формировались в среде пакета прикладных программ

Matlab R2021a с набором инструментов для синтеза и анализа нейронных сетей Neural Network Toolbox. На первом этапе построения искусственных нейронных сетей (ИНС) проводилась предобработка временных рядов перед подачей в нейронную сеть с целью повышения стабильности и скорости обучения. При этом исходный динамический ряд проверялся на стационарность и при ее отсутствии подвергался процедуре нормализации методом *z*-score. Затем данные ряда разделялись на обучающую (70 %), валидационную (15 %) и тестовую (15 %) выборки с сохранением временной последовательности. На втором этапе определялась оптимальная архитектура ИНС, включая определение числа скрытых слоев и количества нейронов в них. На третьем и четвертом этапах производилась настройка и обучение ИНС на основе алгоритма Левенберга – Марквардта (Levenberg – Marquardt method), предназначенного для оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей при решении задач о наименьших квадратах [28, 29]. Содержанием пятого этапа являлась процедура среднесрочного прогнозирования на последующий двухлетний период, шестого – оценка качества нейросетевой модели на основании результатов расчета комплекса метрик, включая взвешенные абсолютные оценки прогнозирования (weighted absolute percent errors, WAPE). Критерием адекватности построенных нейросетевых моделей служит высокая точность результатов прогнозирования по сравнению с экстраполяционными прогнозами методом регрессионного анализа. При прогнозировании СБП применены два типа ИНС с числом нейронов в скрытых слоях от 18 до 34 – Feed-Forward backprop (двухслойная ИНС с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки) и Cascade-Forward backprop (двухслойная каскадная ИНС с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки) (рисунок).

Результаты. Продолжены исследования параметров бактериальной контаминации воды Нижнего Дона, по результатам которых на основе пятиуровневого классификатора был диагностирован очень высокий уровень потенциального микробного риска распространения водообусловленных инфекционных заболеваний [30–32]. Установлено, что по ходу течения в пределах акватории города Азова происходит существенное ухудшение СБП речной воды (табл. 1). Так, наблюдается увеличение среднего количества ОКБ в районе городского пляжа (ТМВ) в 3,2 раза по сравнению с расположенным выше по течению водозабором городского водопровода (ТМА). При этом в 500 метрах ниже точки сброса городских сточных вод (ТМС) этот показатель возрастает в 4,1 раза при наибольшем зафиксированном содержании ОКБ в исследованных пробах $2,40 \times 10^8$ КОЕ/100 см³. Подобное соотношение между точками мониторинга (ТМА:ТМВ:ТМС) определено в отношении среднего содержания в речной воде ТКБ (1,00:4,45:5,91), в том числе

⁵ Дегтярев А.А., Ходырев А.П. Методика анализа годовой динамики инфекционной заболеваемости // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 1976. Т. 53. № 2. С. 97–102.

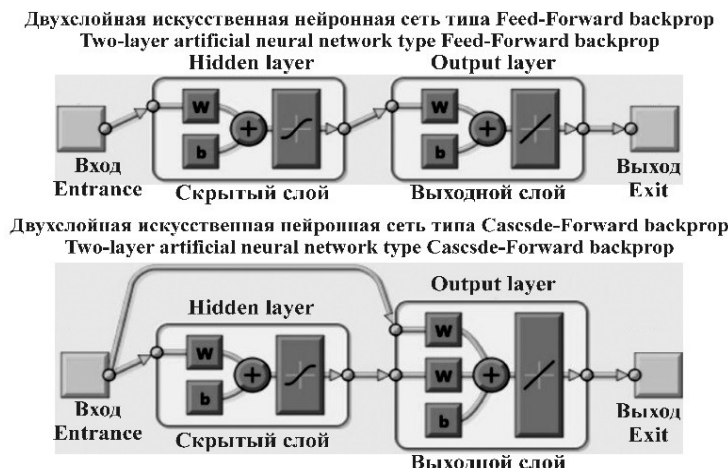


Рисунок. Двухслойные искусственные нейронные сети для прогнозирования санитарно-бактериологических показателей речной воды в акватории города Азов Ростовской области

Figure. Two-layer artificial neural networks for forecasting bacteriological quality parameters of river water in the water area of the city of Azov, Rostov Region

Таблица 1. Регрессионные модели многолетней динамики санитарно-бактериологических показателей воды Нижнего Дона в акватории города Азов Ростовской области за период 2005–2020 гг.

Table 1. Regression models of long-term levels of bacteriological water quality parameters of the Lower Don in the water area of the city of Azov, Rostov Region, 2005–2020

Точки мониторинга / Sampling sites	Среднемуголетние значения / Long-term means	Максимальные муголетние значения / Maximum long-term values	Регрессионные модели муголетней динамики / Regression models of long-term dynamics	Среднемуговые темпы прироста/убыли тенденций (%) / Average annual change rates of trends (%)
Содержание общих колиформных бактерий (КОЕ в 100 см ³) / Total coliforms (CFU/100 cm ³)				
A	1,37 × 10 ⁴	7,00 × 10 ⁵	Yt = 10 750,812 – 2549,965 × log(X)	–2,21
B	4,30 × 10 ⁴	7,00 × 10 ⁶	Yt = 24 783,988 – 6632,782 × log(X)	–2,57
C	5,55 × 10 ⁴	2,40 × 10 ⁸	Yt = 39 671,731 + 13 654,321 × log(X)	+2,35
D	3,98 × 10 ⁴	2,40 × 10 ⁸	Yt = 35 643,901 – 9593,618 × log(X)	–2,59
Содержание термотолерантных колиформных бактерий (КОЕ в 100 см ³) / Thermotolerant coliforms (CFU/100 cm ³)				
A	1,15 × 10 ³	2,40 × 10 ⁵	Yt = 906,938 + 814,687 × log(X)	+5,02
B	5,08 × 10 ³	2,40 × 10 ⁶	Yt = 1475,828 + 3588,051 × log(X)	+9,56
C	6,78 × 10 ³	2,40 × 10 ⁶	Yt = 1559,384 + 688,987 × X	+14,52
D	5,16 × 10 ³	2,40 × 10 ⁶	Yt = 383,399 + 5208,808 × log(X)	+20,97
Содержание глюкозоположительных колиформных бактерий (КОЕ в 100 см ³) / Glucose positive coliforms (CFU/100 cm ³)				
A	7,99 × 10 ⁴	2,40 × 10 ⁶	Yt = 93 421,668 – 23 799,829 × log(X)	–2,42
B	1,08 × 10 ⁵	2,40 × 10 ⁷	Yt = 280 293,733 – 5712,324 × X	–2,41
C	3,86 × 10 ⁵	2,40 × 10 ⁸	Yt = 136 633,305 – 21 172,954 × log(X)	–1,38
D	3,08 × 10 ⁵	2,40 × 10 ⁸	Yt = 205 489,768 – 4267,788 × X	–2,47
Содержание клебсиелл (КОЕ в 100 см ³) / Klebsiella spp. (CFU/100 cm ³)				
A	1,79 × 10 ⁴	2,10 × 10 ⁶	Yt = 13 838,518 + 428,485 × X	+2,59
B	5,77 × 10 ⁴	1,30 × 10 ⁷	Yt = 20 137,651 + 17 398,033 × log(X)	+4,88
C	7,62 × 10 ⁴	2,40 × 10 ⁶	Yt = 79 110,484 – 730,305 × X	–0,98
D	5,65 × 10 ⁴	1,30 × 10 ⁷	Yt = 27 200,024 + 13 335,478 × log(X)	+3,15
Содержание синегнойных палочек (КОЕ в 100 см ³) / Pseudomonas aeruginosa (CFU/100 cm ³)				
A	5,96 × 10 ²	7,00 × 10 ³	Yt = 104,823 + 27,603 × log(X)	+1,86
B	8,04 × 10 ²	2,40 × 10 ⁵	Yt = 308,751 + 436,826 × log(X)	+6,87
C	9,05 × 10 ²	7,00 × 10 ⁴	Yt = 296,419 + 755,513 × log(X)	+9,82
D	7,61 × 10 ²	2,40 × 10 ⁵	Yt = 344,598 + 376,044 × log(X)	+5,76
Содержание сальмонелл (НВЧ в 1000 см ³) / Salmonella spp. (MPN/1000 cm ³)				
A	4,51 × 10 ⁰	2,10 × 10 ³	Yt = 115,921 – 87,167 × log(X)	–14,56
B	9,84 × 10 ⁰	7,00 × 10 ³	Yt = 440,999 – 307,978 × log(X)	–11,54
C	1,71 × 10 ¹	2,40 × 10 ⁴	Yt = 551,122 – 334,508 × log(X)	–20,38
D	1,27 × 10 ¹	2,40 × 10 ⁴	Yt = 154,823 – 122,069 × log(X)	–18,05

Примечание: Точки мониторинга: А – зона водозабора; В – зона рекреации; С – зона выпуска сточных вод. КОЕ – колониеобразующие единицы; НВЧ – наиболее вероятное число; X – порядковый номер года для данных в анализируемом динамическом ряду.

Note: Sampling sites: A – water intake area; B – recreational area; C – sewage drainage area. Abbreviations: CFU, colony-forming units; MPN, most probable number; X, serial number of the year for data in the analyzed dynamic series.

<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-11-51-62>
Original Research Article

входящих в их состав клебсиелл (1,00:3,24:4,28); ГKB (1,00:1,34:4,82), синегнойных палочек (1,00:1,35:1,52) и сальмонелл (1,00:2,18:3,78). Наибольшее содержание в речной воде ТКБ, ГKB и сальмонелл приходится на ТМС – соответственно $2,40 \times 10^6$ КОЕ/100 см³, $2,40 \times 10^8$ КОЕ/100 см³ и $2,40 \times 10^4$ НВЧ/1000 см³, а потенциально патогенных бактерий – клебсиелл ($1,30 \times 10^7$ КОЕ/100 см³) и синегнойных палочек ($2,40 \times 10^5$ КОЕ/100 см³) в воде зоны рекреационного водопользования (ТМВ). Во всех исследованных пробах были обнаружены относящиеся к ТКБ представители рода *Klebsiella* spp., в 99,8 % – *Pseudomonas aeruginosa*, 80,2 % – *Salmonella* spp. Выявлены контрастные различия между точками мониторинга по частоте выделения сальмонелл ($53,89 \pm 7,35$ % в ТМА, $89,44 \pm 4,53$ % в ТМВ и $97,22 \pm 2,42$ % в ТМС) и их сероварам. Так, в воде ТМА преобладали серовары *S. typhimurium* (32,99 %), *S. derby* (22,68 %) и *S. heidelberg* (14,43 %); в ТМВ – *S. typhimurium* (34,16 %), *S. london* (18,01 %) и *S. essen* (16,77); в ТМС – *S. typhimurium* и *S. enteritidis* (по 19,43 %), а также *S. derby* (12,57 %). При этом штаммы *S. enteritidis* были изолированы только из воды ТМС в зоне влияния выпуска городской канализации.

Представленные в таблице 1 результаты ретроспективного анализа многолетней динамики свидетельствуют о сформировавшихся в 2005–2020 гг. разнонаправленных тенденциях СБП воды Нижнего Дона. Так, устойчивые тенденции к увеличению определены в отношении содержания ТКБ, в том числе и *Klebsiella* spp. (кроме отобранных в ТМС проб), а также *Pseudomonas aeruginosa* при среднегодовых темпах прироста (СгТП) +20,96, + 3,14 и + 5,75 % соответственно. При этом наиболее выраженные тенденции к росту содержания ТКБ и синегнойных палочек отмечены в воде ТМС (+14,51 и +9,81 %). В отношении содержания ОКБ (за исключением ТМС), ГKB и сальмонелл диагностированы тенденции к снижению при среднегодовых темпах убыли (СгТУ) соответственно равных –2,58, –2,46 и –18,04 %.

Различное количество нейронов в скрытых слоях построенных нами искусственных нейронных сетей обусловлено специфическими особенностями обрабатываемых вариационных рядов санитарно-бактериологических показателей из-за функциональной асимметрии входных признаков, проявляющейся в их информационной значимости, нелинейной сложности и влиянии на целевую переменную – среднесрочный прогноз [29]. Результаты сравнительной оценки по величинам абсолютных и относительных погрешностей, а также взвешенных абсолютных ошибок прогнозирования (weighted absolute percent errors, WAPE) демонстрируют существенно более высокую достоверность рассчитанных с применением искусственных нейронных сетей среднесрочных прогнозов в отношении большинства из учитываемых СБП для всех точек мониторинга. Так, взвешенные абсолютные оценки прогнозирования (WAPE) на последующий двухлетний период при использовании искусственных нейронных сетей составляли 10,51–10,92 %, а при регрессионном анализе – 30,24–61,49 %, что соответствует точности

полученных среднесрочных прогнозов 89,08–89,49 % и 38,51–69,76 %. Относительно невысокая степень соответствия между прогнозными и фактическими данными, полученными с использованием ИНС и экстраполяции по трендам многолетней динамики, наблюдалась исключительно в отношении содержания сальмонелл в 2020 г. (табл. 2).

Как видно из таблицы 3, содержание ОКБ в речной воде подвержено выраженным сезонным колебаниям, которые, согласно рассчитанным ИСК, достигают пика в апреле, а также в течение четырех месяцев летне-осеннего периода (июль–октябрь) при максимальном значении ИСК в сентябре (252,7 %) и ИСУ, равном 9,5. В отношении содержания ТКБ выявлены три сезонных подъема – весной (апрель–май), летом (июль–август), а также осенью (октябрь), причем наибольшее влияние сезонных факторов приходится на октябрь с величиной ИСК 223,2 % при ИСУ 6,9. Заметное усиление воздействия сезонных факторов на содержание ГKB наблюдается в июле, августе, а также в ноябре, когда ИСК достигает максимального уровня (406,40 %) при значении ИСУ, равном 23,9. Сезонный подъем содержания в речной воде входящих в состав ТКБ *Klebsiella* spp. продолжается на протяжении пяти месяцев (июнь–октябрь) с наибольшим ИСК в сентябре (208,2 %) при ИСУ, равном 12,4. Для *Pseudomonas aeruginosa* оказались свойственны сезонные подъемы летом (июль–август) и осенью (октябрь–ноябрь) при наибольшей выраженности в августе с ИСК, равным 222,9 % и ИСУ 15,0. В целом по трем точкам мониторинга увеличение содержания *Salmonella* spp. отмечено в мае и на протяжении периода сентябрь–декабрь, причем максимальный ИСК (194,2 %) приходится на октябрь при ИСУ 12,3. При этом к сезонным особенностям годовой динамики содержания сальмонелл в воде зоны водозабора (ТМА) относятся два подъема – в июле и в сентябре–октябре.

Результаты сравнения динамики СБП за отдельный календарный год с верхними доверительными границами (ВДГ) их типовых годовых кривых (ТГК), рассчитанных по данным за многолетний период, были применены для идентификации и количественной характеристики аномальных компонент внесезонного генезиса. Так, например, в отношении содержания ОКБ в воде городского пляжа (ТМВ) величина аномальной надбавки в 2010 г. соответствует $8068,1$ КОЕ/100 см³, причем период формирования внесезонной составляющей годовой динамики приходится на сентябрь–ноябрь при максимальном ИСК в сентябре (401,0).

Обсуждение. Анализ данных долгосрочных исследований позволил подтвердить перспективность изучения возможного риска распространения водообусловленных инфекций. В ходе целенаправленных исследований, сфокусированных на решении проблемы снижения вероятности возникновения и распространения водообусловленных инфекций, было выполнено изучение изменений уровней и структуры бактериальной контаминации воды реки Дон в черте города Азова Ростовской области на протяжении 16-летнего периода. В динамике выявлены неблагоприятные санитарно-бактериологические

Таблица 2. Сравнительная оценка точности среднесрочных экстраполяционных прогнозов санитарно-бактериологических показателей воды Нижнего Дона в акватории города Азова Ростовской области, полученных на основе регрессионных и нейросетевых моделей, по данным за период 2005–2018 гг.

Table 2. Comparison of the accuracy of medium-term extrapolation forecasts of bacteriological quality parameters of the Lower Don water in the water area of the city of Azov, Rostov Region, obtained on the basis of regression and neural network models using data for 2005–2018

Типы и названия показателей / Types and names of parameters	Годы / Years	Содержание общих колиформных бактерий (КОЕ в 100 см ³) / Total coliforms (CFU/100 cm ³)			Содержание термотолерантных колиформных бактерий (КОЕ в 100 см ³) / Thermotolerant coliforms (CFU/100 cm ³)			Содержание сальмонелл (НВЧ в 1000 см ³) / Salmonella spp. (MPN/1000 cm ³)			
		Точки мониторинга / Sampling sites			Точки мониторинга / Sampling sites			Точки мониторинга / Sampling sites			
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Среднегодовые значения по результатам исследований / Annual averages based on test results	2019	8199,70	12 971,30	29124,00	2676,00	3355,00	14 227,88	2,76	38,74	43,59	
	2020	9524,80	24000,00	84626,00	1534,39	4349,00	12 028,67	2,43	43,69	983,92	
Двухслойные искусственные нейронные сети (ИНС) / Artificial two-layer neural networks (ANN)	Тип ИНС / Type of ANN	Feed-Forward backprop	Cascade-Forward backprop	Cascade-Forward backprop	Feed-Forward backprop	Cascade-Forward backprop	Cascade-Forward backprop	Feed-Forward backprop	Feed-Forward backprop	Cascade-Forward backprop	
	Количество нейронов в скрытом слое / Number of neurons in the hidden layer	34	21	30	24	20	32	28	18	21	
Прогнозы на основе нейросетевых моделей / Forecasts based on ANN models	2019	8432,78	14 551,35	31 122,72	2381,18	5158,64	12 439,58	3,03	43,54	52,72	
	2020	9119,94	19 772,21	78 991,68	1733,12	2378,93	10 190,83	2,67	36,91	52,04	
Прогнозы на основе регрессионных моделей / Forecasts based on regression models	2019 (X = 15)	7319,19	16 365,13	58 254,03	1743,03	6415,94	8207,12	4,16	28,71	48,01	
	2020 (X = 16)	7225,13	16 143,93	59 688,97	1760,98	6546,10	8412,04	3,95	27,95	43,18	
Погрешности прогнозов на основе ИНС / Errors of forecasts based on ANN models	n	2019	233,08	1580,05	1998,72	294,82	1803,64	1788,30	0,27	4,80	9,13
			%	2,8	12,2	6,9	11,0	53,8	12,6	9,6	12,4
	n	2020	404,86	4227,79	5634,32	198,73	1970,07	1837,84	0,24	6,78	931,88
			%	4,3	17,6	6,7	13,0	45,3	15,3	9,7	15,5
Погрешности прогнозов на основе регрессионных моделей / Errors of forecasts based on regression models	n	2019	880,51	3393,83	29130,03	932,97	3060,94	6020,76	1,40	10,04	4,42
			%	10,7	26,2	100,0	34,9	91,2	42,3	50,5	25,9
	n	2020	2299,67	7856,07	24937,03	226,59	2197,10	3616,63	1,52	15,74	940,75
			%	24,1	32,7	29,5	14,8	50,5	30,1	62,3	36,0
Соотношение абсолютных погрешностей прогнозов на основе регрессионной и нейросетевой моделей / Ratio of absolute errors of forecasts based on regression and ANN models	2019	3,78	2,15	14,57	3,16	1,70	3,37	5,26	2,09	0,48	
	2020	5,68	1,86	4,43	1,14	1,12	1,97	6,40	2,32	1,01	
Различия относительных погрешностей прогнозов на основе регрессионной и нейросетевой моделей (%) / Differences between relative errors of forecasts based on regression and ANN models (%)	2019	7,90	13,98	93,16	23,85	37,48	29,75	40,94	13,53	-10,80	
	2020	19,89	15,12	22,81	1,82	5,22	14,79	52,54	20,51	0,90	

Примечание: точки мониторинга: А – зона водозабора; В – зона рекреации; С – зона выпуска сточных вод. КОЕ – колониеобразующие единицы; НВЧ – наиболее вероятное число; ИНС – искусственная нейронная сеть. Feed-Forward backprop – двухслойная искусственная нейронная сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки. Cascade-Forward backprop – двухслойная каскадная искусственная нейронная сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки.

Notes: Sampling sites: A – water intake area; B – recreational area; C – sewage drainage area. **Abbreviations:** CFU, colony-forming units; MPN, most probable number; ANN, artificial neural network. Feed-Forward backprop is a two-layer artificial neural network with forward propagation of signal and backpropagation of error. Cascade-Forward backprop is a two-layer cascaded artificial neural network with forward propagation of signal and backpropagation of error.

https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-11-51-62
Original Research Article

Таблица 3. Анализ сезонных особенностей годовой динамики санитарно-бактериологических показателей воды Нижнего Дона в акватории города Азова Ростовской области за период 2005–2020 гг.

Table 3. Seasonal fluctuations of bacteriological water quality parameters of the Lower Don in the water area of the city of Azov, Rostov Region, 2005–2020

Оцениваемые показатели / Parameters	Месяцы динамического контроля уровня бактериальной контаминации воды Нижнего Дона / Months of dynamic control of the level of bacterial contamination of the Lower Don water											
	Февраль / February	Март / March	Апрель / April	Май / May	Июнь / June	Июль / July	Август / August	Сентябрь / September	Октябрь / October	Ноябрь / November	Декабрь / December	
Содержание общих колиформных бактерий (КОЕ в 100 см ³) Верхняя граница круглогодичного уровня – 9302,02 КОЕ/см ³ / Индекс сезонности по Уоррингеру – 9,47 / Total coliforms (CFU/100 cm ³) The year-round upper bound is 9,302.02 CFU/cm ³ / Warringer's seasonality index = 9.47												
Типовая годовая кривая / Typical annual curve	7297,34	15219,24	38031,44	21864,27	13361,68	44419,77	38437,34	69139,85	33163,22	11080,96	8965,57	
Индексы сезонных колебаний (%) / Seasonal variation indices (%)	26,68	55,63	139,00	79,92	48,84	162,35	140,49	252,70	121,21	40,51	32,78	
Содержание термотолерантных колиформных бактерий (КОЕ в 100 см ³) Верхняя граница круглогодичного уровня – 1471,18 КОЕ/см ³ / Индекс сезонности по Уоррингеру – 6,93 / Thermotolerant coliforms (CFU/100 cm ³) The year-round upper bound is 1,471.18 CFU/cm ³ / Warringer's seasonality index = 6.93												
Типовая годовая кривая / Typical annual curve	1439,01	2861,36	4270,68	4396,88	1439,16	5111,60	7397,23	1166,19	8081,68	1262,01	1404,01	
Индексы сезонных колебаний (%) / Seasonal variation indices (%)	39,75	79,03	117,96	121,44	39,76	141,18	204,30	32,22	223,21	34,86	66,40	
Содержание глюкозоположительных колиформных бактерий (КОЕ в 100 см ³) Верхняя граница круглогодичного уровня – 37 794,96 КОЕ/см ³ / Индекс сезонности по Уоррингеру – 23,93 / Glucose positive coliforms (CFU/100 cm ³) The year-round upper bound is 37,794.96 CFU/100 cm ³ / Warringer's seasonality index = 23.93												
Типовая годовая кривая / Typical annual curve	36 551,86	108 255,61	120 045,21	67 702,79	153 923,91	322 546,91	399 089,71	116 533,34	120 411,11	867 939,41	36 266,68	
Индексы сезонных колебаний (%) / Seasonal variation indices (%)	17,12	50,70	56,22	31,71	72,08	151,04	186,88	54,57	56,39	406,41	16,99	
Содержание клебсиелл (КОЕ в 100 см ³) Верхняя граница круглогодичного уровня – 12 650,45 КОЕ/см ³ / Индекс сезонности по Уоррингеру – 12,43 / Klebsiella spp. (CFU/100 cm ³) The year-round upper bound is 12,650.45 CFU/cm ³ / Warringer's seasonality index = 12.43												
Типовая годовая кривая / Typical annual curve	8766,68	27 526,45	26 565,94	26 879,91	72 805,31	97 996,45	82 514,15	108 981,49	62 114,82	48 087,66	13 526,68	
Индексы сезонных колебаний (%) / Seasonal variation indices (%)	16,76	52,60	50,76	51,36	139,10	187,23	157,65	208,22	118,68	91,88	25,85	
Содержание синегнойных палочек (КОЕ в 100 см ³) Верхняя граница круглогодичного уровня – 245,28 КОЕ/см ³ / Индекс сезонности по Уоррингеру – 15,00 / Pseudomonas aeruginosa (CFU/100 cm ³) The year-round upper bound is 245.28 CFU/100 cm ³ / Warringer's seasonality index = 15.00												
Типовая годовая кривая / Typical annual curve	326,49	140,46	355,78	591,88	921,80	2005,95	2106,95	649,48	1337,91	1227,53	732,49	
Индексы сезонных колебаний (%) / Seasonal variation indices (%)	34,55	14,87	37,65	62,63	97,54	212,25	222,93	68,73	141,56	129,89	77,51	
Содержание сальмонелл (НВЧ в 1000 см ³) Верхняя граница круглогодичного уровня – 4,54 НВЧ/1000 см ³ / Индекс сезонности по Уоррингеру – 12,26 / Salmonella spp. (MPN/1000 cm ³) The year-round upper bound is 4.54 MPN/1000 cm ³ / Warringer's seasonality index = 12.26												
Типовая годовая кривая / Typical annual curve	3,25	7,29	16,06	36,01	6,86	17,55	10,31	22,38	39,75	29,12	36,61	
Индексы сезонных колебаний (%) / Seasonal variation indices (%)	15,86	35,57	78,44	175,94	33,48	85,72	50,33	109,35	194,25	142,29	178,88	

Примечание: КОЕ – колониобразующие единицы; НВЧ – наиболее вероятное число.

Notes: CFU, colony-forming units; MPN, most probable number.

показатели воды реки Дон, включая высокие уровни содержания патогенной микрофлоры (*Salmonella* spp.) и потенциально патогенных микроорганизмов, представленных *Pseudomonas aeruginosa* и *Klebsiella* spp. Данный факт свидетельствует о значительном уровне микробного риска, обусловленном потенциальной опасностью возникновения и последую-

щего распространения острых кишечных инфекций эпидемического типа, что находит подтверждение в многочисленных исследованиях как российских, так и зарубежных ученых [21, 24, 33, 34].

В процессе работы выявлены и количественно определены тенденции за 16-летний период в отношении комплекса санитарно-бактериологических

показателей. Установлено, что в многолетней динамике сформировались неблагоприятные тенденции увеличения содержания ТКБ, в том числе клебсиелл и синегнойных палочек, что согласуется с данными ряда авторов [6, 7, 15, 34, 35]. Несмотря на определенную тенденцию к снижению содержания ГКБ, сохраняющийся его высокий уровень также свидетельствует о существенном риске распространения водообусловленных инфекционных заболеваний. В ряде работ показано, что при ведении микробиологического мониторинга водной среды этот интегральный показатель является важным критерием при оценке степени эпидемической опасности, так как входящие в структуру ГКБ бактерии по показателям продолжительности выживаемости и устойчивости во внешней среде превосходят многих других представителей патогенной или потенциально патогенной микрофлоры [6, 7, 12, 15, 21, 24, 32].

Полученные в ходе моделирования многолетней динамики тенденции санитарно-бактериологических показателей воды Нижнего Дона оказались статистически значимыми ($p < 0,05$) и были положены в основу среднесрочных прогнозов, основанных на анализе теоретических трендов с применением методов экстраполяции. Одновременно с этим для получения прогнозов на тот же период были задействованы построенные и обученные двухслойные искусственные нейронные сети двух типов – каскадная с прямой передачей сигнала и с обратным распространением ошибки (Cascade-Forward backprop) и с прямой передачей сигнала и с обратным распространением ошибки (Feed-Forward backprop). Сравнительный анализ полученных результатов выявил, что использование нейронных сетей позволяет достичь большей точности предсказаний по сравнению с экстраполяционным подходом, использующим регрессионные модели, так как искусственные нейронные сети способны, во-первых, улавливать и моделировать более сложные и нелинейные взаимоотношения в данных и, во-вторых, адаптироваться к изменяющимся нелинейным трендам и при этом учитывать большее количество факторов, что делает их потенциально более точными [29].

По результатам ретроспективного анализа годовой (помесячной) динамики выявлены контрастные различия в сезонных особенностях изучаемой микрофлоры, проявлением которых является гетерохронность повышения их содержания в речной воде в течение года. Так, типичные сезонные подъемы содержания ОКБ приходятся на апрель и летне-осенний период с июля по октябрь с самой большой выраженностью в сентябре; ТКБ – весной (апрель–май), летом (июль–август) и максимумом осенью (октябрь); ГКБ – летом (июль–август) и наибольший в ноябре. Для *Klebsiella* spp., входящих в состав ТКБ, свойственен продолжительный пятимесячный сезонный подъем (июнь–октябрь), наиболее выраженный в сентябре; для *Pseudomonas aeruginosa* характерны два сезонных подъема – летний (июль–август) и осенний (октябрь–ноябрь) с максимумом в августе. В отношении содержания

в речной воде *Salmonella* spp. также определены два типичных повышения – относительно короткое в мае, а затем в осенне-зимний период (сентябрь–октябрь). Выявленные сезонные особенности бактериальной контаминации речной воды согласуются с данными наблюдений, полученными другими авторами [4, 6, 18, 26, 34, 35].

Ограничения исследования. Работа выполнена на материале за 16-летний период 2005–2020 гг., так как полученные в соответствии с новым СанПиН 1.2.3685–21 данные за 2021–2024 гг. не могут быть применены из-за внесенных изменений в номенклатуру микробиологических исследований, что не позволяет сформировать достаточно продолжительные и однородные динамические ряды, которые необходимы для анализа многолетней и годовой динамики, а также среднесрочного прогнозирования санитарно-бактериологических показателей речной воды.

Выводы

1. Полученные данные многолетнего микробиологического мониторинга исследуемого участка Нижнего Дона с количественной оценкой индикаторов бактериальной контаминации речной воды, полученных на основе определения содержания комплекса представителей санитарно-показательной, потенциально патогенной и патогенной микрофлоры свидетельствуют о значительном риске распространения инфекционных болезней, передающихся через воду.

2. Установлено, что разнообразие и количественные параметры выделяемой из воды реки Дон в акватории города Азова Ростовской области микрофлоры определяются специфическими особенностями биологического загрязнения в многолетней и помесечной динамике. Формирование эпидемического риска в контексте распространения водообусловленных острых кишечных инфекций в значительной мере обусловлено высокими уровнями контаминации речной воды как болезнетворными энтеробактериями (*Salmonella* spp.), так и потенциально патогенными микроорганизмами, включая *Klebsiella* spp. и *Pseudomonas aeruginosa*. Так, наибольшее за период наблюдения содержание в речной воде ОКБ составляет $2,40 \times 10^8$ КОЕ/100 см³, ТКБ – $2,40 \times 10^6$ КОЕ/100 см³, ГКБ – $2,40 \times 10^8$ КОЕ/100 см³, клебсиелл – $1,30 \times 10^7$ КОЕ/100 см³, синегнойных палочек – $2,40 \times 10^5$ КОЕ/100 см³, сальмонелл – $2,40 \times 10^4$ НВЧ/1000 см³. Рассчитанное на основе интегральных показателей потенциального микробного риска по санитарно-гигиеническим факторам «Источник централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения» и «Рекреационное водопользование» за 2005–2020 гг. значение двухфакторного комплексного показателя потенциального микробного риска распространения водообусловленных кишечных инфекций равно 0,612 и по пятиуровневому классификатору соответствует его очень высокому уровню.

3. Построение статистически достоверных математических моделей многолетней вариативности комплекса санитарно-бактериологических характеристик воды поверхностных водных объектов,

применяемых в целях водоснабжения населения и рекреационной деятельности, обеспечивающих объективную качественную и количественную оценку сформировавшихся тенденций, является эффективным способом формирования обоснованных прогнозов эпидемической ситуации в отношении связанных с водным фактором кишечных инфекций бактериальной и вирусной этиологии.

4. При осуществлении процедуры средне-срочного экстраполяционного прогнозирования санитарно-бактериологических показателей воды поверхностных источников, проводимого в рамках проспективного анализа эпидемической ситуации, повышение точности результатов достигается путем применения технологии искусственных нейронных сетей, обязательно сочетаемой с количественной оценкой параметров многолетней динамики на основе ее регрессионных моделей. Прогнозирование одномерных временных рядов требует индивидуального подхода при предобработке исходных данных, выборе оптимальной архитектуры искусственной нейронной сети и ее параметров, включая определение количества входов и выходов, числа скрытых слоев и количества нейронов в них. Поэтому при выборе и построении нейросетевой модели обязательно необходим учет результатов регрессионного анализа исследуемого временного ряда с оценкой характера и направленности тренда и его количественных параметров – среднегодовых темпов прироста или убыли тенденции.

5. При ретроспективном анализе годовой (помесячной) динамики выявлены контрастные различия в сезонных особенностях изучаемых санитарно-показательных, потенциально патогенных и патогенных микроорганизмов, проявлением которых являются гетерохронность и различные степени возрастания их содержания в речной воде в течение годового цикла.

6. Результаты анализа годовой (помесячной) динамики по данным санитарно-бактериологического мониторинга воды поверхностных водотоков и водоемов позволяют объективно определять периоды повышенного потенциального микробного риска возникновения и распространения водообусловленных инфекционных заболеваний с выявлением и дифференцированной оценкой обусловленных различными факторами внесезонного происхождения аномальных надбавок с превышением месячных показателей верхней доверительной границы ($p < 0,05$) типовой годовой кривой.

7. Получаемым на основе комплекса учитываемых санитарно-бактериологических и санитарно-гигиенических факторов прогнозам потенциального микробного риска отводится роль важного компонента информационно-аналитического обеспечения социально-гигиенического мониторинга при разработке оптимизационных управленческих решений профилактического и оздоровительного характера по предупреждению эпидемического распространения водным путем кишечных инфекционных заболеваний, включая совершенствование применяемых технологий водоподготовки и обеззараживания сточных вод, техническое переоснащение водоо-

чистных сооружений в соответствие современными требованиями, своевременное проведение ремонтных работ водораспределительных сетей и другие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попова А.Ю., Зайцева Н.В., Онищенко Г.Г., Клейн С.В., Глухих М.В., Камалтдинов М.Р. Санитарно-эпидемиологические детерминанты и ассоциированный с ними потенциал роста ожидаемой продолжительности жизни населения Российской Федерации // Анализ риска здоровью. 2020. № 1. С. 4–17. doi: 10.21668/health.risk/2020.1.01
2. Онищенко Г.Г. Актуальные задачи гигиенической науки и практики в сохранении здоровья населения // Гигиена и санитария. 2015. Т. 94. № 3. С. 5–9.
3. Зайцева Н.В., Клейн С.В., Май И.В. и др. Риск для здоровья населения и эффективность мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 11. С. 1403–1411. doi: 10.47470/0016-9900-2022-101-11-1403-1411
4. Рахманин Ю.А., Доронина О.Д. Стратегические подходы управления рисками для снижения уязвимости человека вследствие изменения водного фактора // Гигиена и санитария. 2010. Т. 89. № 2. С. 8–13.
5. Трухина Г.М. Оценка микробиологического риска среды обитания для здоровья населения в системе социально-гигиенического мониторинга // Здоровоохранение Российской Федерации. 2008. № 1. С. 43.
6. Mertens A, Arnold BF, Benjamin-Chung J, et al. Is detection of enteropathogens and human or animal faecal markers in the environment associated with subsequent child enteric infections and growth: An individual participant data meta-analysis. *Lancet Glob Health*. 2024;12(3):e433-e444. doi: 10.1016/s2214-109x(23)00563-6
7. Wu B, Wang C, Zhang C, Sadowsky MJ, Dzakpasu M, Wang XC. Source-associated gastroenteritis risk from swimming exposure to aging fecal pathogens. *Environ Sci Technol*. 2020;54(2):921-929. doi: 10.1021/acs.est.9b01188
8. de Santana CO, Spealman P, Azulai D, Reid M, Dueker ME, Perron GG. Bacteria communities and water quality parameters in riverine water and sediments near wastewater discharges. *Sci Data*. 2022;9(1):578. doi: 10.1038/s41597-022-01686-8
9. Pereira MA, Palmeira JD, Ferreira H. Contamination of a water stream and water drainage reaching Matosinhos Beach by antibiotic-resistant bacteria. *Microorganisms*. 2023;11(12):2833. doi: 10.3390/microorganisms11122833
10. Попова А.Ю., Кузьмин С.В., Гурвич В.Б. и др. Информационно-аналитическая поддержка управления риском для здоровья населения на основе реализации концепции развития системы социально-гигиенического мониторинга в Российской Федерации на период до 2030 года // Здоровье населения и среда обитания. 2019. № 9 (318). С. 4–12. doi: 10.35627/2219-5238/2019-318-9-4-12
11. Трухина Г.М., Ярославцева М.А., Дмитриева Н.А. Современные тенденции санитарной микробиологии в реализации санитарно-эпидемиологического надзора за безопасностью водных объектов // Здоровье населения и среда обитания. 2022. Т. 30. № 10. С. 16–24. doi: 10.35627/2219-5238/2022-30-10-16-24
12. Рахманин Ю.А., Иванова Л.В., Артемова Т.З. и др. Сравнительная оценка санитарно-эпидемической значимости индикаторных колиформных показателей качества питьевой воды // Гигиена и санитария. 2019.

- Т. 98. № 3. С. 237–249. doi: 10.18821/0016-9900-2019-98-3-237-249
13. Новикова Ю.А., Фридман К.Б., Федоров В.Н., Ковшов А.А., Тихонова Н.А., Мясников И.О. К вопросу оценки качества питьевой воды систем централизованного водоснабжения в современных условиях // Гигиена и санитария. 2020. Т. 99. № 6. С. 563–568. doi: 10.47470/0016-9900-2020-99-6-563-568
 14. Загайнова А.В., Юдин С.М., Абрамов И.А. и др. Определение перечня потенциально патогенных и патогенных микроорганизмов бактериальной, вирусной и паразитарной природы, циркулирующих в сточных и поверхностных водах. Медицинская паразитология и паразитарные болезни. 2021. № 2. С. 50–63. doi: 10.33092/0025-8326mp2021.2.50-63
 15. Holcomb DA, Stewart JR. Microbial indicators of fecal pollution: Recent progress and challenges in assessing water quality. *Curr Environ Health Rep.* 2020;7(3):311–324. doi: 10.1007/s40572-020-00278-1
 16. Korajkic A, McMinn BR, Harwood VJ. Relationships between microbial indicators and pathogens in recreational water settings. *Int J Environ Res Public Health.* 2018;15(12):2842. doi: 10.3390/ijerph15122842
 17. Denpetkul T, Pumkaew M, Sittipunsakda O, et al. Quantitative microbial risk assessment of the gastrointestinal risks to swimmers at Southeast Asian urban beaches using site-specific and combined autochthonous and fecal bacteria exposure data. *Sci Total Environ.* 2023;902:165818. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165818
 18. Gorski L, Rivadeneira P, Cooley MB. New strategies for the enumeration of enteric pathogens in water. *Environ Microbiol Rep.* 2019;11(6):765–776. doi: 10.1111/1758-2229.12786
 19. Загайнова А.В., Рахманин Ю.А., Талаева Ю.Г. и др. Оценка микробного риска для установления зависимости между качеством воды и заболеваемостью населения кишечными инфекциями // Гигиена и санитария. 2010. Т. 89. № 3. С. 28–31.
 20. Клейн С.В., Вековщина С.А. Приоритетные факторы риска питьевой воды систем централизованного питьевого водоснабжения, формирующие негативные тенденции в состоянии здоровья населения // Анализ риска здоровью. 2020. № 3. С. 49–60. doi: 10.21668/health.risk/2020.3.06
 21. Зайцева Н.В., Сбоев А.С., Клейн С.В., Вековщина С.А. Качество питьевой воды: факторы риска для здоровья населения и эффективность контрольно-надзорной деятельности Роспотребнадзора // Анализ риска здоровью. 2019. № 2. С. 44–55. doi: 10.21668/health.risk/2019.2.05
 22. Зайцева Н.В., Онищенко Г.Г., Май И.В., Шур П.З. Развитие методологии анализа риска здоровью в задачах государственного управления санитарно-эпидемиологическим благополучием населения // Анализ риска здоровью. 2022. № 3. С. 4–20. doi: 10.21668/health.risk/2022.3.01
 23. Онищенко Г.Г. Актуальные проблемы и перспективы развития методологии анализа риска в условиях современных вызовов безопасности для здоровья населения Российской Федерации // Анализ риска здоровью. 2023. № 4. С. 4–18. doi: 10.21668/health.risk/2023.4.01
 24. Schoen ME, Boehm AB, Soller J, Shanks OC. Contamination scenario matters when using viral and bacterial human-associated genetic markers as indicators of a health risk in untreated sewage-impacted recreational waters. *Environ Sci Technol.* 2020;54(20):13101–13109. doi: 10.1021/acs.est.0c02189
 25. González-Fernández A, Symonds EM, Gallard-Gongora JF, et al. Risk of gastroenteritis from swimming at a wastewater-impacted tropical beach varies across localized scales. *Appl Environ Microbiol.* 2023;89(3):e0103322. doi: 10.1128/aem.01033-22
 26. Bhatt A, Dada AC, Prajapati SK, Arora P. Integrating life cycle assessment with quantitative microbial risk assessment for a holistic evaluation of sewage treatment plant. *Sci Total Environ.* 2023;862:160842. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160842
 27. Рахманин Ю.А., Журавлев П.В., Алешня В.В., Панасовец О.В. Применение новой питательной среды для выделения сальмонелл из водных объектов для оценки эпидемической безопасности водопользования // Гигиена и санитария. 2016. Т. 95. № 5. С. 483–490. doi: 10.18821/0016-9900-2016-95-5-483-490
 28. Пархоменко С.С., Леденёва Т.М. Обучение нейронных сетей методом Левенберга – Марквардта в условиях большого количества данных // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2014. № 2. С. 98–106.
 29. Ремезова А.А., Тынченко В.В. Применение искусственных нейронных сетей для решения задач прогнозирования // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2021. Т. 1. № 7. С. 371–374.
 30. Механтьев И.И. Санитарно-гигиенические и эпидемиологические аспекты рекреационного водопользования населения бассейна Верхнего Дона // Здоровье населения и среда обитания. 2020. № 12 (333). С. 23–29. doi: 10.35627/2219-5238/2020-333-12-23-29
 31. Журавлев П.В., Алешня В.В., Панасовец О.П. и др. Санитарно-бактериологическая характеристика воды Нижнего Дона // Гигиена и санитария. 2012. Т. 91. № 4. С. 28–31.
 32. Марченко Б.И., Журавлев П.В., Дерябкина Л.А., Нестерова О.А. Оценка потенциального микробного риска распространения водообусловленных инфекционных заболеваний на участке реки с интенсивным водопользованием // Анализ риска здоровью. 2024. № 4. С. 81–96. doi: 10.21668/health.risk/2024.4.08
 33. Cui Q, Huang Y, Wang H, Fang T. Diversity and abundance of bacterial pathogens in urban rivers impacted by domestic sewage. *Environ Pollut.* 2019;249:24–35. doi: 10.1016/j.envpol.2019.02.094
 34. Калюжин А.С., Байракова А.Л., Морозова М.А., Латышевская Н.И., Руженцова Т.А. Мониторинг *Klebsiella pneumoniae* как один из критериев микробиологической характеристики водного объекта // Гигиена и санитария. 2024. Т. 103. № 3. С. 234–241. doi: 10.47470/0016-9900-2024-103-3-234-241
 35. Шамина О.В., Самойлова Е.А., Новикова И.Е., Лазарева А.В. *Klebsiella pneumoniae*: микробиологическая характеристика, антибиотикорезистентность и вирулентность. Российский педиатрический журнал. 2020. Т. 23. № 3. С. 191–197. doi: 10.18821/1560-9561-2020-23-3-191-197

REFERENCES

1. Popova AYU, Zaitseva NV, Onishchenko GG, Kleyn SV, Glukhikh MV, Kamaltdinov MR. Sanitary-epidemiologic determinants and potential for growth in life expectancy of the population in the Russian Federation taking into account regional differentiation. *Health Risk Analysis.* 2020;(1):4-17. doi: 10.21668/health.risk/2020.1.01.eng
2. Onishchenko GG. Actual problems of hygiene science and practice in the preservation of public health. *Gigiena i Sanitariya.* 2015;94(3):5-9. (In Russ.)
3. Zaitseva NV, Kleyn SV, May IV, et al. Methodical grounds and experience gained in implementing complex assessment of activities aimed at risk to public health and

<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-11-51-62>
Original Research Article

- effectiveness of measures to improve the quality of drinking water in centralized water supply systems. *Gigiena i Sanitariya*. 2022;101(11):1403-1411. (In Russ.) doi: 10.47470/0016-9900-2022-101-11-1403-1411
4. Rakhmanin YuA, Doronina OD. Strategic approaches to risk management to reduce human vulnerability due to water factor changes. *Gigiena i Sanitariya*. 2010;89(2):8-13. (In Russ.)
 5. Trukhina GM. Assessment of an environmental microbiological risk to the population's health in the sociohygienic monitoring system. *Zdravookhranenie Rossiyskoy Federatsii*. 2008;(1):43. (In Russ.)
 6. Mertens A, Arnold BF, Benjamin-Chung J, et al. Is detection of enteropathogens and human or animal faecal markers in the environment associated with subsequent child enteric infections and growth: An individual participant data meta-analysis. *Lancet Glob Health*. 2024;12(3):e433-e444. doi: 10.1016/s2214-109x(23)00563-6
 7. Wu B, Wang C, Zhang C, Sadowsky MJ, Dzakpasu M, Wang XC. Source-associated gastroenteritis risk from swimming exposure to aging fecal pathogens. *Environ Sci Technol*. 2020;54(2):921-929. doi: 10.1021/acs.est.9b01188
 8. de Santana CO, Spealman P, Azulai D, Reid M, Dueker ME, Perron GG. Bacteria communities and water quality parameters in riverine water and sediments near wastewater discharges. *Sci Data*. 2022;9(1):578. doi: 10.1038/s41597-022-01686-8
 9. Pereira MA, Palmeira JD, Ferreira H. Contamination of a water stream and water drainage reaching Matosinhos Beach by antibiotic-resistant bacteria. *Microorganisms*. 2023;11(12):2833. doi: 10.3390/microorganisms11122833
 10. Popova AYu, Kuz'min SV, Gurchich VB, et al. Data-driven risk management for public health as supported by the experience of implementation for development concept of the social and hygienic monitoring framework in the Russian Federation up to 2030. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2019;(9(318)):4-12. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2019-318-9-4-12
 11. Trukhina GM, Iaroslavtseva MA, Dmitrieva NA. Current trends in sanitary microbiology within implementation of sanitary and epidemiological surveillance of safety of water bodies. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2022;30(10):16-24. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2022-30-10-16-24
 12. Rakhmanin YuA, Ivanova LV, Artyomova TZ, et al. Comparative assessment of the sanitary and epidemic importance of coliform indicators of the drinking water quality. *Gigiena i Sanitariya*. 2019;98(3):237-249. (In Russ.) doi: 10.18821/0016-9900-2019-98-3-237-249
 13. Novikova YuA, Friedman KB, Fedorov VN, Kovshov AA, Tikhonova NA, Myasnikov IO. About the question of the assessment of the drinking water quality in centralized water systems in the current conditions. *Gigiena i Sanitariya*. 2020;99(6):563-568. (In Russ.) doi: 10.47470/0016-9900-2020-99-6-563-568
 14. Zagainova AV, Yudin SM, Abramov IA, et al. Definition of the list of potentially pathogenic and pathogenic microorganisms of bacterial, viral and parasitic nature circulating in waste and surface waters. *Meditsinskaya Parazitologiya i Parazitarnye Bolezni*. 2021;(2):50-63. (In Russ.) doi: 10.33092/0025-8326mp2021.2.50-63
 15. Holcomb DA, Stewart JR. Microbial indicators of fecal pollution: Recent progress and challenges in assessing water quality. *Curr Environ Health Rep*. 2020;7(3):311-324. doi: 10.1007/s40572-020-00278-1
 16. Korajkic A, McMinn BR, Harwood VJ. Relationships between microbial indicators and pathogens in recreational water settings. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(12):2842. doi: 10.3390/ijerph15122842
 17. Denpetkul T, Pumkaew M, Sittipunsakda O, et al. Quantitative microbial risk assessment of the gastrointestinal risks to swimmers at Southeast Asian urban beaches using site-specific and combined autochthonous and fecal bacteria exposure data. *Sci Total Environ*. 2023;902:165818. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165818
 18. Gorski L, Rivadeneira P, Cooley MB. New strategies for the enumeration of enteric pathogens in water. *Environ Microbiol Rep*. 2019;11(6):765-776. doi: 10.1111/1758-2229.12786
 19. Zagainova AV, Rakhmanin YuA, Talayeva YuG, et al. Microbial risk assessment to establish water quality-enteric infection morbidity relationships. *Gigiena i Sanitariya*. 2010;89(3):28-31. (In Russ.)
 20. 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):48-59. doi: 10.21668/health.risk/2020.3.06.eng
 21. Zaitseva NV, Sboev AS, Kleyn SV, Vekovshinina SA. Drinking water quality: Health risk factors and efficiency of control and surveillance activities by Rospotrebnadzor. *Health Risk Analysis*. 2019;(2):44-55. doi: 10.21668/health.risk/2019.2.05.eng
 22. Zaitseva NV, Onishchenko GG, May IV, Shur PZ. Developing the methodology for health risk assessment within public management of sanitary-epidemiological welfare of the population. *Health Risk Analysis*. 2022;(3):4-20. doi: 10.21668/health.risk/2022.3.01.eng
 23. Onishchenko GG. Development of the risk analysis methodology given the current safety challenges for public health in the Russian Federation: Vital issues and prospects. *Health Risk Analysis*. 2023;(4):4-18. doi: 10.21668/health.risk/2023.4.01.eng
 24. Schoen ME, Boehm AB, Soller J, Shanks OC. Contamination scenario matters when using viral and bacterial human-associated genetic markers as indicators of a health risk in untreated sewage-impacted recreational waters. *Environ Sci Technol*. 2020;54(20):13101-13109. doi: 10.1021/acs.est.0c02189
 25. González-Fernández A, Symonds EM, Gallard-Gongora JF, et al. Risk of gastroenteritis from swimming at a wastewater-impacted tropical beach varies across localized scales. *Appl Environ Microbiol*. 2023;89(3):e0103322. doi: 10.1128/aem.01033-22
 26. Bhatt A, Dada AC, Prajapati SK, Arora P. Integrating life cycle assessment with quantitative microbial risk assessment for a holistic evaluation of sewage treatment plant. *Sci Total Environ*. 2023;862:160842. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160842
 27. Rakhmanin YuA, Zhuravlev PV, Aleshnya VV, Panasovets OV. Application of the new culture medium for the isolation of Salmonella from water bodies to assess the epidemic safety of water use. *Gigiena i Sanitariya*. 2016;95(5):483-490. (In Russ.) doi: 10.18821/0016-9900-2016-95-5-483-490
 28. Parkhomenko SS, Ledeneva TM. [Neural network training using the Levenberg-Marquardt method in the context of big data]. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Sistemnyy Analiz i Informatsionnye Tekhnologii*. 2014;(2):98-106. (In Russ.)
 29. Remezova AA, Tynchenko VV. [Application of artificial neural networks to solve forecasting problems]. *Aktual'nye Problemy Aviatsii i Kosmonavтики*. 2011;1(7):371. (In Russ.)
 30. Mehantsev II. Sanitary, hygienic and epidemiological aspects of recreational water use of the population of the Upper Don River basin. *Zdorov'e Naseleniya i*

- Sreda Obitaniya*. 2020;(12(333)):23-29. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2020-333-12-23-29
31. Zhuravlev PV, Aleshnya VV, Panasovets OP, et al. Sanitary and bacteriological characteristics of water of the Lower Don. *Gigiena i Sanitariya*. 2012;91(4):28-31. (In Russ.)
 32. Marchenko BI, Zhuravlev PV, Deryabkina LA, Nesterova OA. Assessment of potential microbial risk caused by spread of waterborne infectious diseases in a river area with intensive water use. *Health Risk Analysis*. 2024;(4):81-96. doi: 10.21668/health.risk/2024.4.08.eng
 33. Cui Q, Huang Y, Wang H, Fang T. Diversity and abundance of bacterial pathogens in urban rivers impacted by domestic sewage. *Environ Pollut*. 2019;249:24-35. doi: 10.1016/j.envpol.2019.02.094
 34. Kalyuzhin AS, Bayrakova AL, Morozova MA, Latyshevskaya NI, Ruzhentsova TA. Monitoring of *Klebsiella pneumoniae* as one of the criteria of microecological characterization of a water body. *Gigiena i Sanitariya*. 2024;103(3):234-241. (In Russ.) doi: 10.47470/0016-9900-2024-103-3-234-241
 35. Shamina OV, Samoylova EA, Novikova IE, Lazareva AV. *Klebsiella pneumoniae*: Microbiological characterization, antimicrobial resistance, and virulence. *Rossiyskiy Peditricheskiy Zhurnal*. 2020;23(3):191-197. (In Russ.) doi: 10.18821/1560-9561-2020-23-3-191-197

Сведения об авторах:

Журавлев Петр Васильевич – д.м.н., заведующий лабораторией санитарной микробиологии водных объектов и микробной экологии человека ФБУН «Ростовский научно-исследовательский институт микробиологии и паразитологии» Роспотребнадзора; e-mail: pitthegreat@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8196-3882>.

✉ **Марченко** Борис Игоревич – д.м.н., доцент, профессор Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» Минобрнауки России; e-mail: borismarch@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6173-329X>.

Нестерова Олеся Александровна – аспирант Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» Минобрнауки России; e-mail: semina@sfedu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4263-5103>.

Информация о вкладе авторов: управление проектом, концепция и дизайн исследования, санитарно-микробиологические исследования, сбор и обработка материала, редактирование: *Журавлев П.В.*; концепция и дизайн исследования, программное обеспечение, статистическая обработка, анализ и интерпретация результатов, литературный обзор, написание текста статьи: *Марченко Б.И.*; сбор материала, ресурсы и программное обеспечение, обучение искусственной нейронной сети, моделирование многолетней динамики и прогнозирование: *Нестерова О.А.* Все авторы ознакомились с результатами работы и одобрили окончательный вариант рукописи.

Соблюдение этических стандартов: данное исследование не требует представления заключения комитета по биоэтической этике или иных документов.

Финансирование: исследование проведено без спонсорской поддержки.

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

Статья получена: 18.05.25 / Принята к публикации: 06.11.25 / Опубликовано: 28.11.25

Author information:

Piotr V. **Zhuravlev**, Dr. Sci. (Med.), Head of the Laboratory of Sanitary Microbiology of Water Bodies and Human Microbial Ecology, Rostov Research Institute of Microbiology and Parasitology; e-mail: pitthegreat@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8196-3882>.

✉ Boris I. **Marchenko**, Dr. Sci. (Med.), docent; Professor, Department of Technosphere Safety and Chemistry, Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering, Southern Federal University; e-mail: borismarch@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6173-329X>.

Olesja A. **Nesterova**, Postgraduate, Department of Technosphere Safety and Chemistry, Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering, Southern Federal University; e-mail: semina@sfedu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4263-5103>.

Author contributions: project management, research concept and design, sanitary-microbiological studies, collection and processing of materials, editing: *Zhuravlev P.V.*; research concept and design, software, statistical and analytical data processing, interpretation the results, literature review, writing the manuscript: *Marchenko B.I.*; collection of materials, resources and software, training an artificial neural network, long-term dynamics modeling and forecasting: *Nesterova O.A.* All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Compliance with ethical standards: Not applicable.

Funding: The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

Conflict of interest: The authors have no conflicts of interest to declare.

Received: May 18, 2025 / Accepted: November 6, 2025 / Published: November 28, 2025