



ГИДРОБИОЛОГИЯ/HYDROBIOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.101> EDN: VKVHLU

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ И ОСТРОЙ ТОКСИЧНОСТЬЮ СТОЧНЫХ ВОД (НА ПРИМЕРЕ Р. КОТОРОСЛЬ)

Научная статья

Бульчѳв Б.Ю.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0007-4741-0882;¹ Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, Ярославль, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (bb[at]newjet.ru)

Предложена: 18.03.2026; Принята: 27.03.2026; Опубликовано: 18.05.2026

Аннотация

В работе представлен интегральный подход к оценке качества поверхностных вод, основанный на сочетании микробиологических и биотестовых методов. Цель исследования заключалась в выявлении взаимосвязи между микробиологическими показателями и острой токсичностью сточных вод урбанизированной территории на примере ливневых коллекторов реки Которосль (г. Ярославль). Определялось содержание общих колиформных бактерий и *E. coli*, проводилась оценка острой токсичности методом биотестирования с использованием *C. affinis*. Статистическая обработка данных включала корреляционный анализ по Спирмену. Установлена статистически значимая прямая связь между уровнем острой токсичности и содержанием общих колиформных бактерий ($R=0,37$) и *E. coli* ($R=0,32$). Наиболее выраженная корреляция наблюдалась зимой для общих колиформных бактерий ($R=0,56$) и осенью для *E. coli* ($R=0,74$). Полученные результаты свидетельствуют о том, что микробиологическое загрязнение связано с повышением токсичности сточных вод, однако не является единственным фактором её формирования.

Ключевые слова: микробиологический анализ, биотоксичность, сточные воды, река Которосль.

THE CORRELATION BETWEEN MICROBIOLOGICAL INDICATORS AND THE ACUTE TOXICITY OF WASTEWATER (ON THE EXAMPLE OF THE KOTOROSL RIVER)

Research article

Bulychyov B. Y.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0007-4741-0882;¹ Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russian Federation

* Corresponding author (bb[at]newjet.ru)

Suggested: 18.03.2026; Accepted: 27.03.2026; Published: 18.05.2026

Abstract

The work presents an integrated approach to the assessment of surface water quality, based on a combination of microbiological and bioassay methods. The aim of the study was to identify the correlation between microbiological parameters and the acute toxicity of wastewater from an urbanised area, on the example of storm sewer drains along the Kotorosl River (Yaroslavl). The content of total coliform bacteria and *E. coli* was determined, and acute toxicity was evaluated using bioassays with *C. affinis*. Statistical analysis of the data included Spearman's correlation analysis. A statistically significant positive correlation was established between the level of acute toxicity and the content of total coliform bacteria ($R = 0.37$) and *E. coli* ($R = 0.32$). The strongest correlation was observed in winter for total coliform bacteria ($R = 0.56$) and in autumn for *E. coli* ($R = 0.74$). The obtained results indicate that microbiological contamination is associated with increased wastewater toxicity, but is not the sole factor contributing to its development.

Keywords: microbiological analysis, biotoxicity, wastewater, Kotorosl River.

Введение

Научные исследования последних лет продемонстрировали, что оценка качества поверхностных вод развивается по нескольким взаимосвязанным направлениям. Классические гидрохимические методы остаются основой оценки качества воды, обеспечивая данные о концентрациях химических компонентов, которые используются для расчёта гидрохимических индексов [1], [2], [3]. Однако традиционный гидрохимический анализ ограничен в отражении экологической реакции экосистем, так как не учитывает биологические ответы на комплексные воздействия [4], [5].

Биотестирование и санитарно-бактериологический анализ являются комплементарными подходами в оценке экологического статуса водных систем, дополняя традиционный гидрохимический анализ. Современные российские исследования подтверждают, что микробиологическое исследование и биотестирование поверхностных вод выявляет токсические эффекты, которые трудно определить только гидрохимическими методами, демонстрируя связь между химическим и биологическим контролем [6], [7].

Целью данного исследования являлось изучение взаимосвязи между микробиологическими показателями и острой токсичностью сточных вод на урбанизированной территории.

Методы и принципы исследования

Отбор простых точечных проб для проведения комплексного исследования сточных вод ливневых коллекторов р. Которосль в пределах г. Ярославля осуществлялся в период с 2022 по 2025 гг. в соответствии с нормативом водного надзора 33-5.3.01-85 «Инструкция по отбору проб для анализа сточных вод», методическими указаниями по методам контроля «Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов» МУК 4.2.1884-04. Осуществлялась регистрация GPS-координат точек отбора проб (табл. 1).

Таблица 1 - Точки отбора проб воды для проведения исследования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.101.1>

Шифр точки	Объект	Широта	Долгота
К-1	Ливневый коллектор № 1	57°36'57.79"C	39°50'57.87"B
К-2	Ливневый коллектор № 2	57°36'57.64"C	39°50'58.55"B
К-3	Ливневый коллектор № 3	57°36'48.37"C	39°51'48.22"B
К-4	Ливневый коллектор № 4	57°37'06.81"C	39°52'25.16"B
К-5	Ливневый коллектор № 5	57°37'09.86"C	39°52'50.40"B
К-6	Ливневый коллектор № 6	57°37'13.85"C	39°53'08.57"B
К-7	Ливневый коллектор № 7	57°37'12.97"C	39°53'17.09"B
К-8	Ливневый коллектор № 8	57°36'31.91"C	39°50'31.96"B
К-9	Ливневый коллектор № 9	57°61'18.34"C	39°84'72.57"B

Пробы воды отбирали в стерильные емкости из темного стекла, химически стойкие к исследуемой сточной воде, в турбулентных, хорошо перемешанных потоках на прямолинейных участках водоотводящих устройств вне зон действия подпора.

Для определения содержания общих колиформных бактерий (ОКБ) производили посев на модифицированную среду Эндо. Принимая во внимание неизвестную степень бактериального загрязнения сточных вод, засеивали 3 последовательных десятикратных разведения (1:10, 1:100, 1:1000) в дистиллированной воде, выполняя каждый вариант разведения в двух повторностях. Посевной материал брали с таким расчетом, чтобы получить изолированные колонии. При высеве на подтверждающую среду типичных для лактозоположительных колоний выполняли оксидазный тест путем нанесения капель реактива на часть сектора. При обнаружении оксидазоотрицательных колоний давали положительный ответ на наличие ОКБ в данном объеме пробы.

Подсчитывали число подтвержденных колоний ОКБ. Результат подсчета суммировали и определяли число КОЕ в 100,0 мл по формуле: $X=(a \times 100)/V$, где X — число КОЕ в 100,0 мл, a — число подтвержденных колоний в сумме, V — объем профильтрованной воды. Норматив содержания общих колиформных бактерий: ≤ 500 КОЕ/100 мл.

Для определения числа *Escherichia coli* (*E. coli*) использовали посева, которые были сделаны для проведения анализа на ОКБ. При обнаружении в посевах в среду накопления газа, а при высеве на среду Эндо темно-красных колоний с металлическим блеском (или без него), одновременно подтверждали наличие *E. coli*, для чего по 2–3 типичные колонии с каждого сектора засеивали параллельно в пробирки с лактозной средой и средой, содержащей триптофан, для установления способности ферментировать лактозу до кислоты и газа и продуцировать индол.

Посев производили в среды, прогретые до температуры 44,0–45,0°C, немедленно переносили в термостат и инкубировали при температуре 44,0±1,0°C в течение 24 часов. Продукцию индола определяли с помощью реактива Ковача. Положительным считали результат при наличии кислоты и газа в лактозной среде и при образовании индола. Норматив колониеобразующих единиц *E. coli*: ≤ 100 КОЕ/100 мл.

Оценку острой токсичности проводили методом биотестирования с использованием *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (*C. affinis*) по критериям летальности и сублетальных эффектов модельного объекта. В работе применялись стандартные методики (ФР.1.39.2010.09102, ГОСТ Р 56236-2014), основанные на экспозиции молоди *C. affinis* (возраст 6–24 ч) в пробах воды. Определяли смертность за 24–96 ч в 3–4 повторностях, используя 5–10 особей на концентрацию, при проведении острого токсического эксперимента.

Статистическая обработка данных проводилась при помощи пакета прикладных программ STATISTICA 12.0 (StatSoft Inc., США). Осуществлялась проверка нормальности распределения количественных признаков с использованием критерия Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллифорса. Для изучения взаимосвязи двух признаков

использовался корреляционный анализ по Спирмену. Критический уровень статистической значимости принимался равным 5,0%.

Основные результаты

Проведенный корреляционный анализ продемонстрировал наличие статистически значимой связи между уровнем острой токсичности сточных вод и содержанием санитарно-показательных бактерий.

Обнаружена статистически значимая ($p < 0,05$) средней силы прямая корреляционная связь ($R = 0,37$) между показателями острой токсичности и содержания общих колиформных бактерий. Увеличение концентрации общих колиформных бактерий сопровождается тенденцией к повышению уровня острой токсичности исследуемых сточных вод.

Установлено наличие статистически значимой ($p < 0,05$) прямой средней корреляции ($R = 0,32$) между показателями острой токсичности и содержанием *E. coli* в сточных водах, что свидетельствует об ассоциации острой токсичности и микробиологического загрязнения *E. coli*.

Принимая во внимание эксцессивный характер формирования острой токсичности, было предпринято исследование ее взаимосвязи с микробиологическими показателями в зависимости от сезонного периода (табл. 2).

Таблица 2 - Матрица корреляций микробиологических показателей и показателя острой токсичности сточных вод в зависимости от сезонных периодов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.101.2>

Показатель/ Сезон	ОКБ, КОЕ/100 мл	<i>E. coli</i> , КОЕ/100 мл	ОТ, %
Зимний	0,56 *	0,15	
Весенний	0,35	0,31	
Летний	0,21	0,18	
Осенний	0,20	0,74 *	

Примечание: * - $p < 0,05$

Обнаружено наличие умеренной прямой корреляционной зависимости между показателями ОКБ и ОТ в зимний период ($R = 0,56$; $p < 0,05$), а также сильная положительная корреляция между содержанием *E. coli* и острой токсичностью ($R = 0,74$; $p < 0,05$) в осенний период.

Обсуждение

Наличие статистически значимой прямой корреляционной связи между показателями острой токсичности и содержанием общих колиформных бактерий свидетельствует о том, что источники микробиологического загрязнения, такие как хозяйственно-бытовые сточные воды, одновременно являются источниками широкого спектра органических и химических загрязнителей, способных повышать общую токсичность среды. Для хозяйственно-бытовых и городских сточных вод характерны чрезвычайно высокие концентрации колиформных бактерий, что отражает интенсивную степень микробного загрязнения и сопровождается поступлением различных биологически активных веществ в водные объекты [8].

Вместе с тем выявленная корреляция средней силы указывает на то, что содержание колиформных бактерий является лишь одним из факторов, влияющих на формирование токсичности сточных вод. Вероятно, значительную роль играют также химические загрязнители, продукты метаболизма микроорганизмов, а также другие микробиологические показатели [9].

Статистически значимая средняя положительная корреляция между показателями острой токсичности и содержанием *E. coli*, может указывать на наличие возможной взаимосвязи между уровнем микробиологического загрязнения и токсикологическими характеристиками исследуемой среды. Присутствие *E. coli* указывает на поступление хозяйственно-бытовых сточных вод и органических загрязнений, которые могут содержать широкий спектр химических и биологических контаминантов [10].

Источники фекального загрязнения сточных вод, как правило, являются также источниками различных органических веществ, фармацевтических соединений и других загрязнителей, способных повышать общую токсичность водной среды [11]. Кроме того, микробиологическое загрязнение может сопровождаться образованием биологически активных продуктов метаболизма микроорганизмов, которые способны усиливать токсическое воздействие на водные организмы. В связи с этим комплексная оценка микробиологических показателей и результатов биотестирования рассматривается как эффективный подход к экологической оценке качества водных объектов [12].

Микробиологические индикаторы могут частично отражать общий уровень загрязнения и токсического воздействия в водной среде. При этом сезонные различия в силе корреляции, вероятно, связаны с изменениями температурного режима, гидрологическими процессами и интенсивностью поступления загрязнений в водоемы [13].

Умеренная корреляция между показателями общих колиформных бактерий и острой токсичности в зимний период может быть обусловлена повышенной устойчивостью микроорганизмов и загрязняющих веществ при низких



температурах. Зимой процессы биологической деградации органических и токсичных соединений замедляются, что способствует более длительному сохранению как патогенных микроорганизмов, так и токсикантов в водной среде.

Сильная положительная корреляция между содержанием *E. coli* и показателями острой токсичности в осенний период может указывать на усиление поступления загрязняющих веществ в водоем вследствие сезонных факторов, таких как поверхностный сток, выпадение осадков и разложение органического вещества. Осенью увеличивается перенос загрязнений с сельскохозяйственных территорий и урбанизированных зон, что может приводить к одновременному росту микробиологического загрязнения и токсичности воды [14].

Полученные данные свидетельствуют об ассоциации острой токсичности и микробиологического загрязнения, которое, как правило, связано с поступлением бытовых или фекальных сточных вод. Одновременно острая токсичность может быть обусловлена присутствием химических загрязнителей. Поэтому интегральный подход к оценке состояния сточных вод является необходимым и обязательным условием экологического мониторинга.

Заключение

Таким образом, токсикологические и микробиологические показатели состояния сточных вод являются взаимосвязанными параметрами, формирующимися под воздействием различных источников загрязнения. Взаимосвязь между санитарно-бактериологическими показателями и острой токсичностью сточных вод ассоциирована с сезонными периодами. Комплексное использование методов биотестирования и микробиологического анализа позволяет существенно повысить информативность экологического мониторинга сточных вод урбанизированной территории.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Бакаева Е.Н. Биологические подходы к оценке экотоксикологического состояния водных экосистем / Е.Н. Бакаева, А.М. Никаноров // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2015. — 1 (185). — С. 72–83.
2. Киёк О.В. Современные научные и методические подходы к мониторингу водных объектов и сточных вод: научный обзор / О.В. Киёк, А.Н. Редько, Э.Ю. Енина и др. // Экология человека. — 2025. — 9. — С. 616–627. — DOI: 10.17816/humeco690078
3. Постевая М.А. Оценка качества вод городских озер по гидрохимическим индексам (на примере г. Мурманска) / М.А. Постевая, В.А. Даувальтер, З.И. Слуковский // Российский журнал прикладной экологии. — 2025. — 1 (185). — С. 10–18. — DOI: 10.24852/2411-7374.2025.1.10-18
4. Sun Y. Application of remote sensing technology in water quality monitoring: From traditional approaches to artificial intelligence / Y. Sun, Y. Sun, D. Wang // Water Research. — 2024. — Vol. 267. — P. 122546. — DOI: 10.1016/j.watres.2024.122546
5. Zhao Q. Evaluating a river's ecological health: a multidimensional approach / Q. Zhao, Y. Zhang, X. Li [et al.] // Environmental Science and Ecotechnology. — 2024. — Vol. 21. — P. 100423. — DOI: 10.1016/j.ese.2024.100423
6. Иванов Д.Е. Возможности применения методов биотестирования в интегральной оценке качества поверхностных источников водоснабжения населения / Д.Е. Иванов, Р.А. Сулейманов, А.В. Косарев // Медицина труда и экология человека. — 2022. — 1. — С. 159–176. — DOI: 10.24412/2411-3794-2022-10111
7. Хажеева З.И. Изменение качества воды р. Модонкуль по комбинаторному индексу загрязнения / З.И. Хажеева, А.М. Плюснин, Б.В. Дампилова // Водные ресурсы. — 2024. — № 4. — С. 485–497. — DOI: 10.31857/S0321059624040092.
8. Рахманин Ю.А. Сравнительная оценка санитарно-эпидемической значимости индикаторных колиформных показателей качества питьевой воды / Ю.А. Рахманин, Л.В. Иванова, Т.З. Артемова [и др.] // Гигиена и санитария. — 2019. — 98 (3). — С. 237–249. — DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-3-237-249.
9. Загайнова А.В. Барьерная роль очистных сооружений в обеззараживании сточных вод в отношении *E. coli*, обобщённых и общих колиформных бактерий / А.В. Загайнова, П.В. Журавлёв, М.А. Морозова и др. // Гигиена и санитария. — 2022. — 101 (5). — С. 479–486. — DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-5-479-486.
10. Zaric G. Escherichia coli as microbiological quality water indicator: a high importance for human and animal health / G. Zaric, S. Cocoli, D. Sarcevic [et al.] // Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society. — 2023. — 74 (3). — P. 6117–6124. — DOI: 10.12681/jhvms.30878.
11. Korajkic A. Relationships between microbial indicators and pathogens in recreational water settings / A. Korajkic, B.R. McMinn, V.J. Harwood // International Journal of Environmental Research and Public Health. — 2018. — 15 (12). — P. 2842. — DOI: 10.3390/ijerph15122842.
12. Bitton G. Wastewater Microbiology. 4th ed. / G. Bitton. — Hoboken: Wiley-Blackwell, 2014. — 781 p.
13. Wen X. Microbial Indicators and Their Use for Monitoring Drinking Water Quality—A Review / X. Wen, F. Chen, Y. Lin [et al.] // Sustainability. — 2020. — 12 (6). — P. 2249. — DOI: 10.3390/su12062249.



14. Клубов С.М. Сток биогенных элементов и загрязняющих веществ с городских водосборов / С.М. Клубов, В.Ю. Третьяков // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. — 2022. — № 3. — С. 217–226. — DOI: 10.22363/2313-2310-2022-30-3-217-226.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bakaeva E.N. Biologicheskie podhody' k ocenke e'kotoksikologicheskogo sostoyaniya vodny'x e'kosistem [Biological approaches to assessing the ecotoxicological state of aquatic ecosystems] / E.N. Bakaeva, A.M. Nikanorov // News of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Natural Sciences. — 2015. — 1 (185). — P. 72–83. [in Russian]
2. Kiyok O.V. Sovremennyye nauchny'e i metodicheskie podhody' k monitoringu vodny'x ob'ektov i stochny'x vod: nauchny'j obzor [Modern scientific and methodological approaches to monitoring water bodies and wastewater: scientific review] / O.V. Kiyok, A.N. Red'ko, E'.Yu. Enina et al. // Human ecology. — 2025. — 9. — P. 616–627. — DOI: 10.17816/humeco690078 [in Russian]
3. Postevaya M.A. Ocenka kachestva vod gorodskix ozer po gidroximicheskim indeksam (na primere g. Murmanska) [Assessment of the water quality of urban lakes by hydrochemical indices (on the example of Murmansk)] / M.A. Postevaya, V.A. Dauval'ter, Z.I. Slukovskij // Russian Journal of Applied Ecology. — 2025. — 1 (185). — P. 10–18. — DOI: 10.24852/2411-7374.2025.1.10-18 [in Russian]
4. Sun Y. Application of remote sensing technology in water quality monitoring: From traditional approaches to artificial intelligence / Y. Sun, Y. Sun, D. Wang // Water Research. — 2024. — Vol. 267. — P. 122546. — DOI: 10.1016/j.watres.2024.122546
5. Zhao Q. Evaluating a river's ecological health: a multidimensional approach / Q. Zhao, Y. Zhang, X. Li [et al.] // Environmental Science and Ecotechnology. — 2024. — Vol. 21. — P. 100423. — DOI: 10.1016/j.ese.2024.100423
6. Ivanov D.E. Vozmozhnosti primeneniya metodov biotestirovaniya v integral'noj ocenke kachestva poverkhnostny'x istochnikov vodosnabzheniya naseleniya [Possibilities of using biotesting methods in integral assessment of the quality of surface water supply sources for the population] / D.E. Ivanov, R.A. Sulejmanov, A.V. Kosarev // Occupational medicine and human ecology. — 2022. — 1. — P. 159–176. — DOI: 10.24412/2411-3794-2022-10111 [in Russian]
7. Xazheeva Z.I. Izmenenie kachestva vody' r. Modonkul' po kombinatomnomu indeksu zagryazneniya [Modoncule River Water Quality Change by Combinatorial Pollution Index] / Z.I. Xazheeva, A.M. Plyusnin, B.V. Dampilova // Water resources. — 2024. — № 4. — P. 485–497. — DOI: 10.31857/S0321059624040092. [in Russian]
8. Raxmanin Yu.A. Sravnitel'naya oценка sanitarno-e'pidemicheskoy znachimosti indikatorny'x koliformny'x pokazatelej kachestva pit'evoy vody' [Comparative assessment of sanitary and epidemic significance of indicator coliform indicators of drinking water quality] / Yu.A. Raxmanin, L.V. Ivanova, T.Z. Artemova [i dr.] // Hygiene and sanitation. — 2019. — 98 (3). — P. 237–249. — DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-3-237-249. [in Russian]
9. Zagajnova A.V. Bar'ernaya rol' ochistny'x sooruzhenij v obezrazhivanii stochny'x vod v otnoshenii E. coli, obobshhyonny'x i obshhix koliformny'x bakterij [Barrier Role of Wastewater Treatment Facilities in Wastewater Disinfection for E. coli, Generalized and Total Coliform Bacteria] / A.V. Zagajnova, P.V. Zhuravlyov, M.A. Morozova et al. // Hygiene and sanitation. — 2022. — 101 (5). — P. 479–486. — DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-5-479-486. [in Russian]
10. Zaric G. Escherichia coli as microbiological quality water indicator: a high importance for human and animal health / G. Zaric, S. Cocoli, D. Sarcevic [et al.] // Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society. — 2023. — 74 (3). — P. 6117–6124. — DOI: 10.12681/jhvms.30878.
11. Korajkic A. Relationships between microbial indicators and pathogens in recreational water settings / A. Korajkic, B.R. McMinn, V.J. Harwood // International Journal of Environmental Research and Public Health. — 2018. — 15 (12). — P. 2842. — DOI: 10.3390/ijerph15122842.
12. Bitton G. Wastewater Microbiology. 4th ed. / G. Bitton. — Hoboken: Wiley-Blackwell, 2014. — 781 p.
13. Wen X. Microbial Indicators and Their Use for Monitoring Drinking Water Quality—A Review / X. Wen, F. Chen, Y. Lin [et al.] // Sustainability. — 2020. — 12 (6). — P. 2249. — DOI: 10.3390/su12062249.
14. Klubov S.M. Stok biogeny'x e'lementov i zagryaznyayushhix veshhestv s gorodskix vodosborov [Runoff of biogenic elements and pollutants from urban watersheds] / S.M. Klubov, V.Yu. Tret'yakov // Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and Life Safety. — 2022. — № 3. — P. 217–226. — DOI: 10.22363/2313-2310-2022-30-3-217-226. [in Russian]